



MARS
2022

Accélérer la transition énergétique en France S'inspirer des bonnes pratiques de nos voisins européens

Sous la direction de
Marc-Antoine EYL-MAZZEGA
et Carole MATHIEU

L’Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d’information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l’Ifri est une association reconnue d’utilité publique (loi de 1901). Il n’est soumis à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L’Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l’échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n’engagent que la responsabilité des auteurs.

ISBN : 979-10-373-0515-2

© Tous droits réservés, Ifri, 2022

Images de la couverture : © Shutterstock.com. Montage réalisé par l’Ifri.

Comment citer cette publication :

Marc-Antoine Eyl-Mazzega et Carole Mathieu (dir.), « Accélérer la transition énergétique en France : s’inspirer des bonnes pratiques de nos voisins européens », *Études de l’Ifri*, Ifri, mars 2022.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Auteurs

Andreas W. Bett est l'un des deux directeurs de l'Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire (Fraunhofer ISE) à Fribourg en Allemagne et professeur en Matériaux et technologies de l'énergie solaire à la faculté de Mathématiques et Physique de l'Université de Fribourg. Ses principaux domaines de recherche portent sur le silicium, la croissance épitaxiale de semi-conducteurs Si et III-V, le développement de techniques de caractérisation pour les dispositifs de cellules solaires avancées et la fabrication de cellules solaires. Par ailleurs, il développe des modules et des systèmes de concentrateurs photovoltaïques (CPV) et participe aux essais sur le terrain. Il est également cofondateur de la société Concentrix Solar qui fabrique et installe des systèmes CPV. En outre, il est membre actif du groupe de travail 7 de l'IEC TC82 pour la normalisation des technologies CPV et membre du groupe de travail 3 de la plateforme européenne PV.

Benoît Bizet est attaché Climat & Énergie à l'ambassade du Danemark en France. Sa mission principale est de renforcer les relations bilatérales entre la France et le Danemark dans le domaine des énergies renouvelables (dont l'éolien en mer et l'efficacité énergétique). Il a, entre autres, été à l'origine de l'accord sur l'éolien en mer signé en décembre dernier par le ministère de la Transition écologique et son homologue danois, le ministère du Climat, de l'Énergie et des Travaux publics, ainsi que celui qui sera prochainement signé entre la Commission de régulation de l'énergie et l'Agence danoise de l'énergie. Avant d'occuper son poste actuel, il était conseiller principal, expert en matière de politique et de réglementation de l'énergie éolienne en mer au Centre de coopération mondiale de l'Agence danoise de l'énergie (Energistyrelsen). Benoît Bizet a plus de 13 ans d'expérience dans l'éolien.

Feargal Brennan est professeur d'ingénierie *offshore* à l'Université de Strathclyde et chef du département d'architecture navale et de génie océanique et marin. Il est directeur et chercheur principal du centre de formation doctorale Strathclyde-Oxford-Cranfield Renewable Energy Marine Structures (REMS) et directeur de recherche du centre de formation doctorale Wind & Marine Systems and Structures (WAMSS). Il est « Offshore Wind Champion » pour le programme Supergen d'EPSRC sur les énergies renouvelables en mer et chercheur principal au Ocean-Refuel UKRI EPSRC. Il siège au groupe d'experts scientifiques du BEIS (ministère britannique des Affaires, de l'Énergie et de la Stratégie industrielle), SOWEC (Scottish Offshore Wind Energy Council) et au conseil consultatif

académique du NZTC (Net Zero Technology Centre). Il est membre permanent du Royaume-Uni et chef de la délégation britannique à l'ISSC (International Ship and Offshore Structures Congress) et a servi de témoin expert pour les litiges commerciaux relatifs à l'éolien *offshore* à la Cour d'arbitrage international de Londres.

Sylvie Cornot-Gandolphe est consultante en énergie, spécialiste des questions internationales. Depuis 2012, elle collabore avec le Centre Énergie & Climat de l'Ifri en tant que chercheur associé, avec *CyclOpe*, la publication de référence sur les matières premières et avec CEDIGAZ, le Centre international d'information sur le gaz naturel de l'IFPEN.

Sylvie a une connaissance approfondie des marchés gaziers et charbonniers mondiaux, acquise au cours de sa carrière, tout d'abord comme secrétaire général de CEDIGAZ, au sein de l'IFPEN, puis directrice de projet, au Centre du gaz de la commission économique pour l'Europe des Nations unies à Genève, puis administrateur principal, expert en matière de gaz, à l'Agence internationale de l'énergie, puis adjointe au directeur du développement commercial, au sein d'ATIC SERVICES et conseiller auprès du président pour les questions énergétiques.

Marc-Antoine Eyl-Mazzega est directeur du Centre Énergie & Climat de l'Ifri.

Hans Martin Henning est l'un des deux directeurs de l'Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire ISE. Physicien spécialisé dans la recherche sur les technologies énergétiques, il occupe depuis 2017 la chaire « Systèmes d'énergie solaire » à l'INATECH de l'Université Albert-Ludwigs de Fribourg. Depuis le 1^{er} septembre 2020, il est membre du Conseil allemand d'experts sur les questions climatiques (ERK). Il est également actif dans divers comités et agit comme porte-parole de l'Alliance énergétique de la Fraunhofer-Gesellschaft. Il a également été nommé membre à part entière de l'Académie allemande des sciences et de l'ingénierie (Acatech). Depuis mi-2014, il est l'un des chercheurs du projet « Systèmes énergétiques du futur », coordonné par les académies scientifiques Acatech, Leopoldina et l'Union des académies allemandes des sciences.

Ses principaux domaines de recherche comprennent les technologies énergétiques dans les bâtiments, le couplage sectoriel, le refroidissement solaire, le chauffage solaire et le stockage de la chaleur.

Mikael Hildén est professeur à SYKE, l'Institut finlandais de l'environnement, dont il dirige le programme Changement climatique. Ses principaux domaines de recherche sont l'évaluation des politiques

climatiques, en particulier en ce qui concerne les innovations, les transitions sociétales et l'utilisation des ressources naturelles. Il a été chargé d'évaluer les stratégies nationales finlandaises en matière de changement climatique et d'énergie et a contribué à la recherche sur les outils de surveillance et d'évaluation de l'action climatique. Il a également dirigé, sous l'égide du Conseil de recherche stratégique de Finlande, un programme de recherche pour le développement d'une société finlandaise neutre sur le plan climatique et économe en ressources.

Paula Kivimaa est professeur chercheur en Climat et Société à SYKE, l'Institut finlandais de l'environnement, et chercheur à l'Académie de Finlande. Ses recherches vont de l'analyse des politiques climatiques, énergétiques et environnementales du point de vue de l'innovation à l'examen du changement et de la stabilité dans les systèmes d'énergie et de transport. Elle s'intéresse notamment à l'analyse des politiques dans une perspective de transition vers une économie à faible émission de carbone, aux liens entre les transitions énergétiques et la sécurité, et à l'expérimentation des politiques. Elle est l'auteur de plus de 50 chapitres de livres et articles de revues à comité de lecture, et a contribué à plusieurs rapports, notes d'orientation et réponses à des consultations adressées aux décideurs politiques dans les domaines du climat, de l'énergie, des transports et de l'innovation. Paula Kivimaa est également chercheur associé à la Science Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex Business School et membre du Finnish Climate Change Panel.

Cécile Maisonneuve est conseillère au Centre Énergie & Climat de l'Ifri. Elle a commencé sa carrière comme administrateur de l'Assemblée nationale et a travaillé successivement pour la commission de la Défense, où elle était en charge notamment des affaires stratégiques, la commission des Lois puis celle des Affaires Étrangères, où elle suivit en particulier les questions énergétiques. Cadre dirigeant chez AREVA de 2007 à 2012, elle y fut d'abord en charge des affaires internationales de la présidence du directoire et de la prospective internationale. Elle prit ensuite la responsabilité des affaires publiques européennes et internationales. Administrateur d'AREVA NC, elle fut également membre du conseil d'administration de la fondation AREVA. Cécile Maisonneuve a collaboré avec le Center for Strategic and International Studies (CSIS) et la Fondation pour la recherche stratégique. Elle est membre du Cercle Jefferson et du club de réflexion Femmes et Gouvernance.

Carole Mathieu est responsable des politiques européennes au Centre Énergie & Climat de l'Ifri.

Sommaire

INTRODUCTION	9
PAYS-BAS – LE SDE++, UN MÉCANISME INNOVANT POUR LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS ET L’OPTIMISATION DES DÉPENSES PUBLIQUES	13
Fonctionnement.....	13
Premiers résultats : succès pour le CCS	15
L’intérêt du SDE++ et les leçons tirées des deux premiers tours	16
ROYAUME-UNI – DÉCARBONATION DE L’ÉLECTRICITÉ – UNE PERSPECTIVE BRITANNIQUE.....	18
Une politique d’électrification des usages.....	19
La contribution essentielle de l’éolien en mer	20
Un défi industriel majeur	21
DANEMARK – LE MODÈLE DANOIS DE GOUVERNANCE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE.....	23
Développement massif des énergies renouvelables	23
Efforts d’efficacité énergétique	25
Intégration sectorielle	25
Partenariats internationaux	26
FINLANDE – STRATÉGIES FINLANDAISES EN MATIÈRE DE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE	27
Contexte : éléments clés de la politique climatique et de la réduction des émissions	27
Efforts de cohérence horizontale	28
Collaboration public-privé dans l’élaboration des politiques relatives au climat, à l’énergie et aux transports.....	30
Une culture de l’expérimentation dans l’ensemble du gouvernement ...	31
Points critiques.....	33

ITALIE – CONSTRUIRE ET ANTICIPER UNE MOBILITÉ DURABLE : L'EXEMPLE MILANAIS	34
Un modèle innovant de tarification de l'usage de l'espace public.....	34
Les quatre leçons de la « zone C »	35
Des résultats probants.....	36
Enseignements pour la France	37
ALLEMAGNE – DÉVELOPPER ET METTRE À L'ÉCHELLE LES FUTURES TECHNOLOGIES SOLAIRES ET PROMOUVOIR LA CHAÎNE DE VALEUR EUROPÉENNE : LE RÔLE DE FRAUNHOFER	39
Priorités : PV solaire, PV thermique et intégration système.....	40
Chef de file dans la promotion de l'innovation, de la mise à l'échelle et de l'industrialisation	41
Perspectives pour favoriser une nouvelle industrie solaire européenne et pour la coopération franco-allemande	43
ANNEXE : LISTE DES PUBLICATIONS DE L'IFRI SUR LES ENJEUX EUROPÉENS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE.....	46

Résumé

La réussite de la transition énergétique est d'abord un enjeu de bonne gouvernance, celle-ci devant reposer sur l'expertise et la délibération collective. Depuis 2008, le Royaume-Uni pilote sa stratégie climatique au travers de budgets carbone juridiquement contraignants à horizon de 5 ans. Ils sont élaborés par le comité sur le changement climatique qui formule aussi des recommandations détaillées, secteur par secteur, en vue de l'introduction des politiques publiques correspondantes. Pour éviter une instabilité réglementaire au gré des alternances politiques, le Danemark mise sur le consensus national en organisant une délibération et une approbation des « accords énergétiques » par le Parlement, sur la base de recommandations proposées entre autres par le Conseil du climat et de l'industrie. En Finlande, un grand ministère de coordination a été établi récemment afin de concevoir des plans de décarbonation sectoriels, en concertation avec les ministères compétents. Les processus d'élaboration de ces plans sont ouverts et inclusifs, avec une mise à disposition des documents préparatoires et études de fond commandées par le gouvernement, et un encouragement donné aux parties prenantes de soumettre des contributions. Ces plans sont ensuite débattus au Parlement avant leur adoption par le gouvernement.

La transition énergétique est aussi un défi en termes de coût-efficacité des politiques publiques, qui doivent déclencher une vague d'investissements dans l'efficacité énergétique, la production d'énergie décarbonée, la décarbonation du transport ou la transformation de l'appareil productif à l'aune de la contrainte climatique. Ce souci d'optimisation de la dépense publique a conduit les Pays-Bas à introduire le mécanisme de subvention SDE++ qui met en concurrence l'ensemble des technologies en fonction de leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) au moindre coût pour la collectivité. Ce guichet unique permet d'investir en priorité sur les projets à fort impact climatique, conduisant actuellement à un développement rapide du solaire photovoltaïque sur toitures et de la technologie du captage-stockage du CO₂. Au Danemark comme au Royaume-Uni, l'électrification des usages est la voie privilégiée pour décarboner l'économie, en mettant à profit le potentiel de l'éolien en mer du Nord. Les dispositifs de contrats pour différence continuent d'être affinés et le Royaume-Uni poursuit l'expansion du secteur en eaux profondes grâce à la technologie de l'éolien flottant, qui va prochainement être développée au large de l'Écosse à hauteur de 15 gigawatts (GW). Situés à distance des côtes, l'impact visuel de ces installations est réduit par rapport à la production d'énergie renouvelable à

terre et l'acceptabilité des projets est également favorisée par la prise en compte des retombées économiques locales dans les procédures d'attribution des licences. Pour ces deux pays, le prochain défi est d'intégrer ces développements dans une vision intégrée du système énergétique, *via* l'introduction de nouvelles briques technologiques en matière de stockage d'énergie et de production d'hydrogène. Le concept d'île énergétique, porté par le Danemark, ouvre ainsi la perspective d'une couverture totale des besoins nationaux à partir de l'éolien en mer.

En outre, la transition énergétique est un défi industriel sans précédent qui ne peut être relevé sans une approche partenariale entre acteurs privés et publics. Au Danemark, un centre pour les économies d'énergie a été mis en place, avec pour mission de formuler des recommandations aux entreprises afin de réaliser des économies d'énergie/d'électricité. En Allemagne, l'institut Fraunhofer oriente son agenda de recherche et d'innovation en fonction des priorités de financement public et des besoins de l'industrie, pour à la fois concourir à la décarbonation du système énergétique de demain tout en assurant la souveraineté technologique. Ses travaux ciblent prioritairement le solaire photovoltaïque (PV), afin de mettre au point des solutions adaptées à chaque potentiel de production, de développer des concepts de fabrication durable des technologies PV et de revitaliser l'industrie allemande et européenne dans un contexte où les chaînes d'approvisionnement sont fragilisées. Les solutions d'intégration sectorielle offrent aussi un important potentiel de création de valeur et d'avance technologique. Dans le cas de l'éolien en mer qui est un secteur hautement spécialisé et dominé par un petit nombre d'acteurs, le leader européen qu'est le Royaume-Uni met aussi l'accent sur le contenu local dans la sélection des porteurs de projet. La logique de baisse des coûts des technologies est désormais complétée par une logique de sécurisation des capacités industrielles correspondantes.

Enfin, l'échelon de l'État n'est pas suffisant pour couvrir l'ensemble des problématiques associées à la transition énergétique. À ce titre, la Finlande encourage l'expérimentation à tous les niveaux pour favoriser de nouveaux apprentissages scientifiques et normatifs concernant les écosystèmes à faibles émissions de carbone. En Italie, le succès de la politique de mobilité durable menée par la ville de Milan peut également servir d'exemple. Elle se distingue par l'introduction d'un modèle innovant de tarification de l'usage de l'espace urbain qui apporte aussi des solutions pour les livreurs et sociétés du bâtiment, la mise à disposition d'alternatives crédibles à la voiture individuelle, la mobilisation des outils numériques et le déploiement concomitant d'opérations de requalification urbaine. Enfin, l'échelon international mérite une attention particulière, comme le montre l'exemple danois. Il s'agit d'une part de développer les interconnexions électriques pour renforcer la sécurité d'approvisionnement électrique, mais aussi d'établir des partenariats intergouvernementaux pour favoriser la complémentarité des politiques nationales de transition énergétique et assurer un fléchissement plus rapide des émissions mondiales de GES.

Introduction

L'Europe n'est plus en paix et subit de multiples chocs géopolitiques, énergétiques, économiques et sans doute bientôt, sociaux. L'élection présidentielle de 2022 devra marquer un tournant dans la politique énergétique de la France, face à des enjeux, défis et menaces inédits de court, moyen et long terme.

Fixés en 2015, les objectifs climatiques inscrits dans la loi française sont rendus caducs par le relèvement des ambitions européennes qui visent non plus une réduction de 40 % mais d'au moins 55 % des émissions nettes d'ici 2030 par rapport au niveau de 1990. La France devra aligner ses efforts sur cette nouvelle cible, mais aussi suivre l'impulsion donnée par les politiques sectorielles de l'Union européenne (UE) en matière de promotion des énergies renouvelables (ENR), d'efficacité énergétique ou encore de tarification du carbone. La transition énergétique en France doit évidemment s'inscrire dans le contexte européen et les débats devront impérativement intégrer cette dimension clé.

Au cours du quinquennat qui s'achève, de nombreuses initiatives structurantes ont été lancées en faveur de la protection du climat : création du Haut Conseil pour le climat (HCC) en 2018 et organisation d'une convention citoyenne en 2019, promotion par la France de textes européens novateurs sur la déforestation importée et la tarification du carbone aux frontières notamment, dépenses du plan de relance fléchées vers le soutien aux investissements verts (e.g. mobilité électrique, rénovation thermique), début d'une simplification administrative pour faciliter les projets ENR et, dernièrement, mise en œuvre d'une politique industrielle orientée sur la maîtrise des chaînes de valeur de la transition énergétique au travers du plan France 2030. L'enjeu est désormais d'accélérer la baisse des émissions dans l'ensemble des secteurs et de changer l'échelle des transformations. Le rythme annuel de baisse des émissions doit doubler, l'industrie doit être transformée rapidement et les secteurs du résidentiel, du transport et de l'agriculture doivent amorcer une décarbonation en profondeur. Ce choc de décarbonation doit s'accompagner d'un choc d'investissement et de mesures pour accompagner la transformation de tous les pans d'activité de l'économie. Mais toutes les solutions ne sont pas bonnes, la transition ne se fera pas quoi qu'il en coûte et ce qui est possible techniquement ne fait pas forcément sens économiquement ou d'un point de vue systémique : c'est donc une cohérence d'ensemble qu'il faudra chercher, à la fois intérieure et extérieure, avec nos voisins et partenaires européens.

À l'urgence climatique et environnementale se conjugue l'impérieuse nécessité de garantir la sécurité énergétique (gazière, pétrolière, électrique, minérale, cyber) dans un contexte de tensions maximales sur les marchés de l'énergie avec des prix au plus haut, de guerre en Ukraine et d'opposition frontale entre la Russie et l'Occident qui renforcent la volatilité des prix et représentent une menace sur les approvisionnements physiques. Et ce dans un contexte global de rivalités économiques et technologiques exacerbées avec nos rivaux (Chine), mais aussi nos partenaires (États-Unis, Japon). L'UE et la France se trouvent prises en étau car leur extrême dépendance aux importations d'énergies fossiles constitue toujours une immense vulnérabilité, tandis que le rythme de déploiement des alternatives bas-carbone reste trop lent pour changer le rapport de force vis-à-vis des grands fournisseurs d'énergies fossiles. La France dispose certes actuellement d'une électricité décarbonée à plus de 90 %, mais cette électricité représente moins d'un quart de la consommation d'énergie finale. Depuis plusieurs semaines, face au manque d'électricité nucléaire et renouvelable, nous avons accru notre recours aux importations carbonées pour les pointes. Nous payons très cher les insuffisantes avancées depuis la crise de 2008, suite à laquelle le sommet du G20 de Pittsburgh avait appelé de ses vœux une croissance économique bas-carbone.

C'est aussi la sécurité économique et sociale qu'il faut garantir face à l'inflation qui frappe les ménages et à la dégradation de la compétitivité industrielle. Tous les gouvernements européens ont pris des mesures dans l'urgence pour alléger les factures électriques et gazières, et réfléchissent à des mesures similaires sur les carburants. La France a eu raison d'agir, mais face à un coût qui va dépasser les 20 milliards d'euros pour 2022 et une situation qui va s'inscrire dans la durée, quatre principes doivent guider ces interventions : agir massivement sur la réduction de la demande dans l'urgence avec des campagnes d'information, d'incitation et des mesures réglementaires ; distinguer entre les catégories de consommateurs et ne pas réintroduire des subventions massives aux énergies fossiles ; garder les signaux prix pour favoriser les alternatives ; ne pas creuser la dette car les crises seront longues et il faut pouvoir garder des marges de manœuvre. Il est impératif de faire des ajustements.

Pour atteindre la souveraineté énergétique et renforcer sa souveraineté industrielle, la France devra accélérer sa sortie des énergies fossiles, dont le coût exorbitant grève aujourd'hui la compétitivité industrielle et le pouvoir d'achat des ménages, mais aussi déployer une stratégie industrielle qui lui assure une maîtrise suffisante des chaînes de valeur des technologies bas-carbone – nucléaire, renouvelables, batteries, stockage d'électricité, métaux et hydrogène notamment – car la domination de ces marchés porteurs par des acteurs extra-européens risque de générer une dépendance tout aussi insoutenable et des effets négatifs sur l'emploi.

Les trajectoires de décarbonation qui seront précisées par cette campagne devront tenir compte de la multiplicité des tensions extérieures, ainsi que des contraintes et opportunités intérieures. Outre les chaînes logistiques perturbées et les coûts des matériaux de base qui grimpent, il faut intégrer l'acceptabilité locale des projets industriels, les enjeux d'égalité en sachant que nul ne devra être mis au pied du mur, ou encore d'accompagnement des changements structurels à l'échelle des différents secteurs économiques et territoires. Les choix ne sont pas purement technico-économiques mais relèvent d'un projet de société qui mérite d'être amplement discuté pour éviter les blocages lors de la mise en œuvre et permettre la mobilisation de tous. Cette transition n'est pas qu'un sujet d'offre énergétique et de prix et coûts, c'est aussi et avant tout un enjeu de demande qui doit baisser fortement dans tous les scénarios. C'est au fond le sujet du vivre ensemble qui engage plusieurs générations dans un processus de longue haleine, complexe, essentiel et inévitable, et dont une impulsion fondamentale devra être donnée. En ce sens, la transition énergétique ne peut être un sujet marginal ou abordé de manière partielle : c'est bien le sujet central qui engage l'avenir social, économique et stratégique de notre pays, en Europe et dans le monde, et c'est la responsabilité de tous les candidats de se l'approprier.

Enfin, cette campagne électorale doit être l'occasion d'un sursaut de responsabilité de tous les acteurs de la société française sur ces crises et cette transition énergétique : en prendre toute la mesure, en particulier de l'accélération et l'objectif ultime, la neutralité climatique ; comprendre que chacun doit agir dans l'urgence ces prochains mois, et non pas ces prochaines années, et réfléchir à ce rôle ; enfin débattre des grands choix de sociétés qui y sont liés, par exemple : comment faire face aux chocs énergétiques et industriels dans la durée pour accompagner les ménages, les entreprises et les industriels, dans un contexte budgétaire critique et de menaces sur les approvisionnements ? Comment aider les plus vulnérables ? Qui devra payer, quand et comment ? Côté demande, quelles priorités pour décarboner, quels secteurs électrifier, à quel rythme, dans quels secteurs garder les molécules, avec quel séquençage, comment gérer la nouvelle donne du gaz ? Comment faire baisser la demande – efficacité énergétique, sobriété et changement des comportements ? Côté offre, quelles technologies et trajectoires, comment renforcer l'acceptabilité ? Comment faire évoluer la formation et les emplois ? Quels rôles et cohérences entre l'État, les territoires, les villes, les entreprises et les citoyens ? Et à chaque fois, la responsabilité impose de prendre en compte le système et l'efficacité-coût des mesures envisagées.

Si un consensus national robuste émerge sur ces questions, la loi de programmation sur l'énergie et le climat, attendue d'ici juillet 2023, servira de boussole pour le déclenchement des investissements dans les solutions bas-carbone et leur déploiement à grande échelle.

Face à ces défis, la France gagnerait à porter son regard au-delà de ses frontières nationales et à s'inspirer des initiatives portées dans les pays voisins. Cette étude collective apporte un éclairage sur la façon dont les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Danemark, la Finlande, l'Italie et l'Allemagne abordent certains chantiers de politique énergétique et climatique, afin d'en tirer des enseignements utiles pour le cas français.

PAYS-BAS

Le SDE++, un mécanisme innovant pour la réduction des émissions et l'optimisation des dépenses publiques

Sylvie Cornot-Gandolphe

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ définis dans l'accord climat de 2019, en 2020, les Pays-Bas ont fait évoluer leur programme de subvention SDE+, qui soutenait la production d'ENR, vers le mécanisme SDE++, qui subventionne la réduction des émissions de CO₂. Ce mécanisme est conçu de manière à optimiser la réduction des émissions de CO₂ et la dépense publique¹. Le SDE prévoit initialement 30 milliards d'euros (€) de subventions jusqu'en 2025. Les résultats du premier cycle de financement (décembre 2020) ont été annoncés en juin 2021 et le deuxième tour s'est clôturé en novembre 2021. Cette note explique le fonctionnement du SDE++, les résultats et les enseignements tirés de ces deux premiers tours.

Fonctionnement

Le SDE++ élargit le portefeuille de technologies éligibles du mécanisme précédent SDE+. La subvention s'applique maintenant à la tonne de carbone évitée au lieu de la production d'ENR, de sorte que les technologies de réduction de CO₂ sont désormais également éligibles². Pour le premier cycle de 2020, deux nouvelles catégories ont été ajoutées : chaleur bas-carbone (dont chaudières électriques et pompes à chaleur) et production bas-carbone. Cette dernière catégorie comprenait l'hydrogène produit par électrolyse (ci-après « hydrogène vert ») et le captage et séquestration du carbone (*Carbon Capture and Storage* – CCS) dans le secteur industriel. En 2021, les technologies incluses ont encore été élargies. Dans la catégorie production bas-carbone, le captage

1. « Construction d'un monde bas-carbone. Le système de subvention innovant des Pays-Bas », Mazars, avril 2021, disponible sur : www.mazars.fr.

2. « SDE++ 2021. Stimulation of Sustainable Energy Production and Climate Transition », Agence néerlandaise pour les entreprises (RVO), octobre 2021, disponible sur : <https://english.rvo.nl>.

et l'utilisation du carbone pour les serres horticoles et les biocarburants avancés pour le transport ont été ajoutés.

Le SDE++ tient compte de la capacité de la technologie à réduire les émissions de CO₂ et met en concurrence les technologies les unes par rapport aux autres *via* un système d'enchères. Les candidatures ayant la plus faible intensité de subvention (en euros par tonne de CO₂ – €/tCO₂) sont prioritaires, afin d'inciter les candidats à réaliser leurs projets au moindre coût et optimiser la dépense publique. Ce système, découpé en 4 phases d'application, permet un regroupement des projets des moins au plus coûteux. Lors de la première phase, seuls les projets avec une intensité de subvention jusqu'à un certain seuil (en €/tCO₂) sont éligibles, après quoi le SDE++ est progressivement ouvert aux projets avec une intensité de subvention plus élevée. Le niveau de base des subventions correspond au niveau nécessaire pour rentabiliser l'investissement. Par exemple, pour le premier cycle de financement 2020, la première phase d'application (jusqu'à 65 €/tCO₂) et la deuxième phase (jusqu'à 85 €/tCO₂) incluaient principalement des projets de CCS et de PV en toiture. La troisième phase (jusqu'à 180 €/tCO₂) et la quatrième phase (jusqu'à 300 €/tCO₂), incluaient principalement des projets de grands parcs solaires PV, de chaudières industrielles électriques et de géothermie. Les niveaux de base retenus pour chaque phase sont revus chaque année (par exemple, les nouveaux seuils en 2021 sont : 60 €/tCO₂/t, 80 €/tCO₂, 115 €/tCO₂ et 300 €/tCO₂).

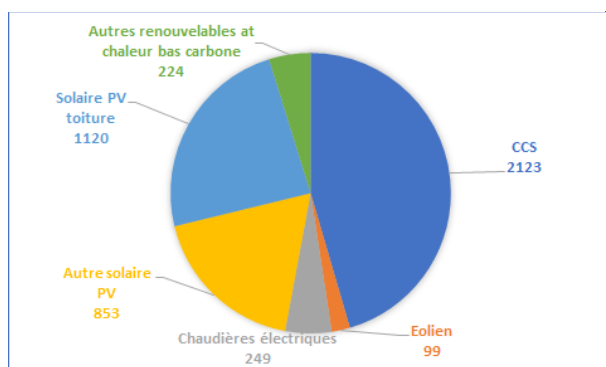
Le SDE++ est structuré de telle manière que seule la partie non rentable des technologies reçoit une subvention *via* un mécanisme équivalent aux contrats carbone pour la différence (CCfD). Dans le cas du CCS, les projets reçoivent une subvention sur la quantité de CO₂ captée et stockée. Le niveau de subvention dépend des technologies de captage utilisées pour chaque projet et comptabilise les coûts de transport et de stockage. La subvention couvre la différence entre le coût de capture, transport et stockage du CO₂ et le prix du CO₂ sur le marché européen (EU ETS). Les projets de CCS sélectionnés reçoivent des subventions pendant 15 ans à partir du début de l'exploitation du projet. Le financement du CCS *via* le SDE++ est limité (jusqu'à présent) à 7,2 MtCO₂/an de réduction d'émissions industrielles jusqu'en 2030, soit la moitié de l'effort demandé au secteur industriel et à 3 Mt CO₂/an pour la production d'électricité.

L'Agence néerlandaise pour les entreprises (RVO), qui gère le programme, applique plusieurs critères de sélection des projets, dont : l'intensité de subvention la plus faible (approche coût-efficacité) et la date à laquelle le projet a été soumis (approche *first come, first serve*). Elle vérifie également que les projets soient techniquement réalisables. Par exemple, les projets CCS doivent envoyer un rapport sur la disponibilité du transport et du stockage du CO₂, même si le demandeur ne le fait pas lui-même.

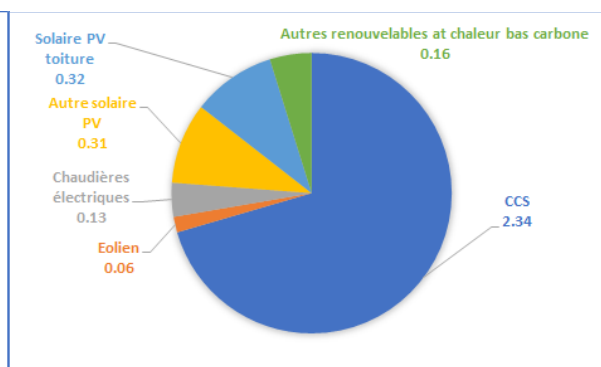
Premiers résultats : succès pour le CCS

Le premier cycle de financement du SDE++ (5 milliards € de subventions) s'est clôturé mi-décembre 2020. Le gouvernement a reçu 4 112 candidatures portant sur 6,4 milliards € et attribué 4,7 milliards € de subventions à 3 486 projets³. Le CCS et le solaire PV sont les deux grands gagnants de ce premier tour, recevant 87 % des subventions allouées (graphique 1). Les 6 projets CCS subventionnés font partie du projet Porthos (port de Rotterdam). Ils reçoivent une subvention maximale de 2,1 milliards €. Le solaire PV reçoit 2 milliards €. Le succès rencontré par le solaire PV depuis 2016 (avec le SDE+) se confirme, avec 3 426 projets retenus, représentant 3,53 gigawatts (GW) sur les 4,4 GW de capacités recevant des subventions. Les projets de ce premier cycle permettent une réduction nette de 3,32 MtCO₂/an, dont 70 % sont assurés par les projets CCS, démontrant la performance coût-efficacité de ces projets (graphique 2).

Graphique 1 : Subventions maximales allouées (million €)



Graphique 2 : Réduction nette des émissions (MtCO₂/an)



Source : RVO

Malgré ce franc succès, ce premier tour a montré que les technologies les plus chères ne sont pas bien représentées dans le mécanisme actuel. La chaleur renouvelable et bas-carbone n'a reçu que 19 % des subventions demandées ; la géothermie n'a reçu aucune subvention ; la biomasse (dont biogaz) n'a reçu que 80 millions € sur 354 millions € demandés. Dans le cas de l'hydrogène vert, un seul projet de 2 mégawatts (MW) était candidat et n'a pas été retenu.

Le deuxième tour d'application (qui a débuté le 5 octobre et s'est terminé le 11 novembre 2021) a été largement sursouscrit : 4 129 candidatures ont été déposées portant sur 12,1 milliards € (budget disponible : 5 milliards €)⁴. Ces projets représentent 7,32 MtCO₂/an de réduction nette. Les demandes

3. « SDE++: 2020 Results and Upcoming 2021 Round », *Policy note*, Aurora Energy Research, 16 septembre 2021.

4. « SDE++ 2021 largement sursouscrit : demande de budget de 12,1 milliards d'euros », RVO, 13 décembre 2021, disponible sur : www.rvo.nl (en néerlandais).

les plus élevées proviennent des projets CCS (11 projets pour 6,1 milliards €), du solaire PV (2,2 milliards € pour une puissance installée de 4 GW) et des projets de captage et utilisation du carbone (29 projets pour 1,15 milliard €). La sélection est en cours et les résultats sont attendus à la fin du printemps 2022.

L'intérêt du SDE++ et les leçons tirées des deux premiers tours

L'élargissement du SDE+ au SDE++ traduit la reconnaissance par les Pays-Bas et de l'UE de l'importance de financer une gamme de technologies à faible émission de carbone, telles que le CCS, au niveau national. C'est un instrument indispensable, complémentaire des aides mises en place au niveau européen. L'intérêt porté par les investisseurs montre le succès du mécanisme.

Le SDE++ offre plusieurs avantages. Il garantit la sécurité d'investissement et la stabilité du régime de subventions nécessaires aux investisseurs, et favorise ainsi le déploiement des technologies, leur développement ultérieur et la réduction des coûts. Le système garantit que la réduction de CO₂ est réalisée de la manière la plus efficace possible et donc que la réduction de CO₂ est maximisée à court terme (rapport coût-efficacité). La mise en concurrence des technologies *via* un mécanisme unique optimise chaque euro investi sur des projets à fort impact climatique. Par ailleurs, le SDE++ montre comment l'EU ETS peut être connecté à la politique d'innovation au niveau national.

Le système est flexible. Des ajustements annuels sont effectués. Par exemple, de nouvelles technologies sont ajoutées (élargissement), les catégories existantes sont affinées (approfondissement) et les tarifs sont mis à jour sur la base d'une consultation annuelle du marché afin de s'aligner au plus près des projets et des évolutions du marché.

Deux enseignements ont été tirés des deux premiers tours⁵ :

Les acteurs sont prêts à investir massivement dans les technologies permettant de réduire les émissions à court terme. Ainsi, en 2022, le budget du SDE++ sera revu à la hausse (3 milliards € supplémentaires). Le plafond du CCS dans le dispositif sera également relevé d'un maximum de 2,5 Mt/an.

Mais la manière dont est conçu le SDE++ (priorité coût-efficacité de la subvention à l'horizon 2030) ne permet pas de prendre en compte les technologies aux coûts plus élevés mais nécessaires à moyen et long terme

5. « Lettre du Parlement sur l'avancement de SDE++ 2021, l'ouverture de SDE++ 2022 et la proposition de modifier SDE++ à partir de 2023 », Rijksoverheid, 3 décembre 2021, disponible sur : www.rijksoverheid.nl, (en néerlandais).

(2030 à 2050) pour atteindre les objectifs climatiques (par exemple l'hydrogène vert). Afin de remédier à cet inconvénient majeur, le gouvernement néerlandais va introduire des modifications au mécanisme d'ici 2023. Il prévoit d'introduire des « clôtures » (budget minimum) et cela par domaine, avec cinq domaines proposés (production d'électricité renouvelable ; chaleur basse température ; chaleur haute température ; le captage, le stockage ou l'utilisation du CO₂ ; et les molécules – y compris le gaz vert, les carburants renouvelables avancés et la production d'hydrogène). Dans un premier temps, le SDE++ serait ouvert aux technologies les plus chères, alors qu'une deuxième phase concernerait les technologies moins chères. Ainsi, si le budget alloué aux technologies les plus chères n'est pas alloué complètement, les technologies moins chères qui n'ont pas pu être retenues le seraient dans un deuxième temps. Cette modification devrait permettre de trouver un nouvel équilibre entre rentabilité à court terme (rapport coût-efficacité) de la subvention et soutien aux technologies dans tous les domaines.

Enfin, il faut noter que le mécanisme SDE++ n'est qu'un des instruments de la politique climatique néerlandaise. L'introduction d'une taxe carbone depuis le 1^{er} janvier 2021 constitue également une forte incitation aux projets CCS (qui sont exempts de la taxe). D'autres instruments existent pour l'hydrogène vert, complétant le SDE++ (par exemple, le NIKI, National Investment Scheme for Industry Climate Projects). Au-delà des subventions du SDE++, la réglementation en faveur de l'hydrogène vert est en cours de révision (définition du rôle des opérateurs de réseau et de système ; éolien *offshore* et production d'hydrogène ; schéma financier portant sur la construction des électrolyseurs)⁶.

Le succès du SDE++ pour promouvoir une forte réduction des émissions à court terme pourrait en faire un modèle pour la conception d'une politique de décarbonation au niveau national. La France a fait le choix de diversifier ses services de financement pour atteindre les objectifs de décarbonation définis dans la Stratégie nationale bas-carbone (guichets verts, procédures de mise en concurrence, etc.). Le SDE++ offre un système unique, qui met en concurrence les technologies de décarbonation et assure l'optimisation de la dépense publique ainsi que la réduction des émissions de CO₂. Il pourrait devenir un outil supplémentaire de la politique de décarbonation française.

6. V. Jacobs, S. Wagemakers et J. E. Janssen, « Green Horizons : New Regulation for Green Hydrogen in the Netherlands », Stek, 13 décembre 2021, disponible sur : www.lexology.com.

ROYAUME-UNI

Décarbonation de l'électricité

– une perspective britannique

Feargal Brennan

Le bouquet énergétique pour la production d'électricité varie considérablement d'un pays à l'autre et, dans le cas du Royaume-Uni, il évolue depuis des décennies. Par exemple, en 1980, le charbon représentait 67 % de l'électricité fournie alors que le gaz n'en représentait que 0,5 % et le nucléaire 19 %. En 2007, le gaz est devenu la première source d'électricité britannique avec une part de 43 % du bouquet énergétique, tandis que le charbon tombait à 34 % et le nucléaire conservait pratiquement la même part du bouquet – aucune ENR n'était représentée de façon significative. À peine plus de dix ans plus tard, en 2019, les énergies éolienne et solaire représentaient 22 % de la production d'électricité ; le charbon, presque éliminé, se situait à moins de 2 % ; et le gaz à 36 %, ce qui signifie que la moitié de la production d'électricité au Royaume-Uni en 2019 provenait de sources à faible émission de carbone, à savoir les ENR et le nucléaire. Cela illustre le fait que, alors que nous entendons souvent parler d'une nouvelle « révolution énergétique », les sources primaires d'électricité au Royaume-Uni et dans de nombreuses régions du monde n'ont cessé d'évoluer pendant des décennies. Ces changements sont venus répondre à des variations dans la demande, les ressources disponibles, la fiabilité, la résilience, le prix et les politiques de durabilité ainsi que les forces du marché.

En réponse à l'urgence climatique, le Royaume-Uni a adopté sa Loi sur le changement climatique en 2008, qui a introduit un objectif juridiquement contraignant de réduction des émissions de GES d'au moins 80 % en dessous du niveau de référence de 1990 d'ici 2050, avec un objectif intermédiaire de réduction des émissions d'au moins 34 % d'ici 2020. Point important, cette loi a également introduit des « budgets carbone » (BC), qui définissent la trajectoire à adopter pour atteindre ses objectifs. Ces budgets carbone, élaborés par un Comité sur le changement climatique (CCC) indépendant et adoptés par le gouvernement, fixent des limites sur la quantité totale de GES qui peut être émise au Royaume-Uni pendant une période donnée de cinq ans. Juridiquement contraignants, ils constituent une approche « tremplin » pour réaliser les ambitions du pays en matière de changement climatique. Il s'agit des BC1 (2008 à 2012) ; BC2 (2013 à 2017) ; BC3 (2018 à 2022) ; BC4 (2023 à 2027) ; BC5 (2028 à 2032) et BC6

(2033 à 2037). Le CCC donne des conseils détaillés, secteur par secteur, sur le niveau pertinent de chaque budget carbone, et une fois qu'un budget carbone a été établi, la Loi sur le changement climatique oblige le gouvernement à préparer des politiques pour garantir le respect de ce budget. Le dernier BC6 a inscrit dans la loi (2021) un nouvel objectif de réduction des émissions de 78 % d'ici 2035 par rapport au niveau de référence de 1990, une trajectoire conforme à l'accord de Paris sur le climat. Il intègre pour la première fois la part du Royaume-Uni dans les émissions de l'aviation et du transport maritime internationaux, en vue d'amener le Royaume-Uni à plus des trois quarts du parcours vers la neutralité carbone d'ici 2050.

Une politique d'électrification des usages

L'électricité n'est bien sûr qu'un seul élément de ce tableau d'ensemble et, si l'on tient compte du chauffage, des transports, de l'utilisation de l'énergie agricole et industrielle, l'électricité a joué un rôle de premier plan dans la réduction des émissions de 74 % depuis 1990 (65 % au cours de la dernière décennie). Depuis cette date, des centrales thermiques à charbon ont fermé, la demande d'électricité a chuté et la capacité de production d'ENR a augmenté. Dans d'autres secteurs, cependant, 99 % de la distance parcourue sur les routes britanniques le sont dans des véhicules équipés de moteurs à essence et diesel, tous les vols commerciaux sont alimentés par des combustibles fossiles, moins de 5 % de l'énergie utilisée pour chauffer les maisons et les bâtiments proviennent de sources à faible émission de carbone. Enfin, seulement 25 % environ de la demande en énergie de l'industrie sont satisfaits par l'électricité ou l'hydrogène. Afin de décarboner ces autres secteurs, il est prévu d'augmenter significativement l'utilisation de l'électricité pour les transports, les bâtiments et l'industrie, ce qui signifie que la demande d'électricité augmentera de 50 % d'ici 2035, et doublera voire triplera d'ici 2050. Cette politique consiste à rendre les transports plus « verts » par conversion aux véhicules électriques, et à utiliser l'électricité pour le chauffage et l'industrie. Si les efforts consentis par le Royaume-Uni en matière de décarbonation de l'électricité sont louables, l'électrification radicale et sans précédent du bouquet énergétique n'est pas sans défis.

Dans ce contexte, le problème évident devient le stockage de l'électricité/de l'énergie, car nous dépendons toujours plus de sources d'ENR intermittentes et abandonnons progressivement le gaz, une source d'énergie qui a jusqu'à présent largement réussi à compenser ce caractère intermittent. C'est là un territoire encore inexploré, qui dépend fortement de technologies en cours de développement, et qui est soumis aux aléas d'une chaîne d'approvisionnement internationale en développement. Par conséquent, le risque persiste que l'objectif prévu ne soit pas atteint. Le CCC devra donc surveiller de près la situation, en particulier les

performances de l'hydrogène et d'autres solutions en cours de développement, pour formuler en conséquence ses conseils sur la trajectoire à adopter.

La contribution essentielle de l'éolien en mer

La politique gouvernementale (détaillée dans le dernier budget carbone) compte sur l'éolien en mer pour apporter la plus grande contribution à la demande d'électricité du Royaume-Uni en atteignant 40 GW en 2030, et en voie de produire 65 à 125 GW d'ici 2050. Il existe des dispositifs sur le marché pour les CFD (*Contracts for Difference*), qui continueront à être affinés. Ceux-ci constituent la base des baux éoliens et garantissent le prix de l'électricité. Les coûts des principales technologies à faible émission de carbone n'ont cessé de baisser, c'est-à-dire que le prix contractuel de l'électricité produite par l'éolien en mer a considérablement diminué à mesure que le secteur mûrit, en grande partie grâce à la confiance des investisseurs, maintenant que les technologies arrivent à maturité, et au coût de financement associé, grâce à un cadre politique de faible risque efficace. Cependant, il convient d'avertir qu'il s'agit des prix contractuels de l'éolien en mer, et qu'ils n'ont pas encore été atteints. Étant donné qu'il a fallu vingt ans pour passer la barre des dix premiers GW d'éolien en mer, le fait de quadrupler cette quantité d'ici 2030 est pour le moins très ambitieux, surtout en imposant 60 % de contenu local comme prévu. Pour y parvenir, un certain nombre de facteurs devront être réunis, notamment la capacité du secteur en termes de compétences et de disponibilité, dans un marché d'approvisionnement international en concurrence avec les demandes d'autres territoires.

Le Royaume-Uni bénéficie d'eaux exceptionnellement peu profondes dans le sud de la mer du Nord, à proximité de vastes zones demandeuses d'électricité. Cela a permis d'étendre rapidement les technologies éoliennes terrestres aux sites en eau peu profonde. Leur acceptation par le public a été relativement facile, en faisant valoir le fait que les éoliennes sont plus efficaces en mer que sur terre. L'éolien terrestre s'est heurté à une forte opposition publique, le déploiement en mer a donc été bien accepté, en particulier pour les grands sites « hors de vue », en eaux peu profondes au large. Le secteur a tiré les enseignements de l'octroi des licences pour l'éolien terrestre. Par ailleurs, les évaluations d'impact sur l'environnement (EIE) ainsi que les annonces d'investissements locaux dans les communautés côtières économiquement défavorisées se sont traduites par une opposition bien moins forte du public à l'égard de l'éolien en mer par rapport à l'éolien terrestre. Il convient de souligner que le sud-est de l'Angleterre est inhabituel à cet égard et comparé au nord de l'Angleterre, à l'Écosse, à la mer d'Irlande et même à la Méditerranée, les eaux sont beaucoup plus profondes et il y a donc peu de sites près du rivage. La zone

impose de développer l'éolien flottant pour poursuivre l'expansion du secteur. Cela s'est vu notamment dans les résultats du cycle de baux d'énergie éolienne en mer ScotWind en Écosse annoncés le 17 janvier 2022, où 15 GW sur les 25 GW de baux ont été attribués à l'éolien flottant, une technologie qui en est à ses balbutiements et qui nécessite un développement et une optimisation importants. Le Coût actualisé de l'électricité (CAE) de ces nouvelles technologies n'est pas considéré comme une préoccupation majeure, mais leur capacité à se développer assez rapidement est une importante source d'incertitude.

Un défi industriel majeur

On ne saurait sous-estimer l'importance des obstacles qui s'opposent à ces objectifs ambitieux. Les chiffres sont pharaoniques et le rythme de changement sans précédent. L'éolien en mer, contrairement à l'éolien terrestre, est un secteur hautement spécialisé : en 2020, seuls deux constructeurs ont fourni 92 % de toute la capacité connectée dans le monde, et aucun d'eux n'a de lien particulièrement fort avec le Royaume-Uni. Cette faible diversité de l'offre présente un fort contraste avec l'éolien terrestre, pour lequel pas moins de quinze sociétés se partagent 96 % du marché mondial. En plus de son immaturité, l'éolien flottant pose également de nouveaux problèmes de sécurité ainsi que d'autres défis opérationnels, et il y aura très certainement de nouvelles réglementations concernant la sécurité et les domaines connexes. Les cycles d'octroi de licences ont évolué et récemment, chez ScotWind, les aspects hors coûts (CAE) ont un poids beaucoup plus important dans l'examen des offres, avec une prise en compte des aspects environnementaux, du contenu local, de la VAB (valeur ajoutée brute), de la diversité de la main-d'œuvre et du devenir des installations. Bon nombre de ces aspects ont été développés dans le cadre de l'Offshore Wind Sector Deal (2018), un large consensus entre le gouvernement et les parties prenantes. Les prochains cycles d'octroi de licences au Royaume-Uni seront probablement moins axés sur le CAE, car les possibilités de nouvelles réductions de coûts sont toujours plus limitées et les avantages macroéconomiques d'un contenu local accru deviennent politiquement intéressants. Il sera peut-être même accepté que l'éolien flottant et la production d'hydrogène verte, bien qu'ils soient plus chers, ont leur place dans le bouquet énergétique global, étant donné leur potentiel à fournir de l'énergie plus longtemps que l'éolien terrestre et l'éolien en mer posé.

Pour conclure, le Royaume-Uni a donc suivi une voie raisonnablement réfléchie vers la neutralité carbone. Le pays a accompli des progrès significatifs dans la décarbonation de l'électricité, un peu par chance, grâce aux eaux peu profondes du sud de la mer du Nord, et il a été particulièrement lent à décarboner d'autres sources d'énergie. L'objectif est d'étendre et de développer rapidement l'éolien en mer dans des endroits

plus difficiles tout en reconnaissant le besoin et l'opportunité de maximiser le contenu local et la VAB, afin de concevoir, fabriquer et entretenir une plus grande part des infrastructures d'ENR en mer au niveau national. Cela a été encouragé par les cycles d'octroi de baux qui ont jusqu'à présent réussi à produire les résultats escomptés.

En ce qui concerne les enseignements à tirer et les parallèles avec la France, qui s'est historiquement beaucoup moins reposée sur le charbon et les combustibles fossiles pour produire de l'électricité, l'inévitable électrification des transports et d'autres domaines sera similaire. Les eaux territoriales françaises ont à peu près les mêmes profondeurs que celles de l'Écosse et l'éolien flottant sera donc nécessaire pour que le secteur se développe. La capacité, le contenu local et la macroéconomie sont des domaines clés qui doivent être développés et le cycle de location de fonds marins de ScotWind est un bon exemple de la façon dont cela peut être encouragé. Mais seul l'avenir nous dira si c'est avec succès ou non.

DANEMARK

Le modèle danois de gouvernance de la transition énergétique

Benoît Bizet

Au Danemark, la transition énergétique prend son essor à la suite de la crise pétrolière des années 1970 et elle est ensuite façonnée par une longue tradition d'accords énergétiques/climatiques. Des mesures drastiques de réduction des consommations sont déployées pour traverser la crise (dimanche sans voiture, chauffage et lumières éteints dans les maisons individuelles, etc.) et le Danemark entreprend alors un tournant dans sa politique énergétique dans le but premier de réduire la dépendance du pays à l'énergie importée. Pour atteindre ses objectifs climatiques et éviter une instabilité réglementaire au gré des alternances politiques, le Danemark mise sur le consensus national en organisant une délibération et une approbation des accords par le Parlement, sur la base de recommandations proposées entre autres par le Conseil du climat et de l'industrie. Il s'agit d'un organisme indépendant, qui regroupe neuf experts danois qui, depuis 2015, conseillent le gouvernement danois sur la politique climatique. Les membres du Conseil sont nommés par le ministre du Climat, de l'Énergie et des Utilités pour des mandats de quatre ans.

Développement massif des énergies renouvelables

Un premier accord adopté en 1985 vise à augmenter la part des ENR dans le mix énergétique danois, en misant notamment sur l'éolien au détriment de l'énergie nucléaire. Les années qui suivront seront marquées par une succession d'initiatives réglementaires destinées à faciliter le raccordement des ENR et à renforcer le réseau électrique, mais aussi à améliorer les processus de sélection des projets (appels d'offres) et d'autorisation administrative (système de guichet unique communément appelé « One-Stop-Shop »), et enfin à créer la flexibilité nécessaire au développement d'une énergie certes abondante mais fluctuante grâce aux centrales thermiques de cogénération. À l'horizon 2050, le Danemark entend convertir l'ensemble de son approvisionnement énergétique (électricité,

chaleur, industrie et transports) aux énergies renouvelables. Grâce à sa politique énergétique ciblée, le pays a, depuis la crise pétrolière, porté la part des ENR à 25 % de sa consommation d'énergie finale, ce qui représente un quart du chemin à parcourir. Sur les deux dernières années (2019 et 2020), plus de 50 % de la consommation électrique danoise a été couverte par les ENR (essentiellement l'éolien et le photovoltaïque). En 2030, le Danemark espère atteindre une consommation électrique couverte à 100 % par les énergies renouvelables, avec environ 70 % d'éolien, 20 % de photovoltaïque et 10 % de biomasse et autres bioénergies⁷.

Pour soutenir l'effort d'investissement, le Danemark a fait évoluer le modèle de financement des énergies renouvelables. La taxe PSO (Public Service Obligation), payée par les consommateurs d'électricité, a été durant de nombreuses années le moteur du financement de la transition énergétique danoise et donc du développement des technologies de l'éolien terrestre, mais aussi en mer. Elle décroît progressivement depuis 2006 et sera abolie en 2022. Depuis 2006, le moyen dominant de financement des ENR passe donc tous les ans par la loi des finances, qui redistribue l'argent des contribuables afin d'assurer leur développement et de ce fait les objectifs climatiques du pays. Les récents résultats de l'appel d'offres du parc éolien Thor de 1000 MW en mer du Nord, ont démontré que non seulement l'éolien en mer pouvait être développé sous les conditions du marché de l'électricité seules, et donc de ne rien coûter à l'État, mais qu'en plus il allait lui rapporter de l'argent. En d'autres termes, les développeurs payent pour produire de l'énergie éolienne en mer du fait du système de contrat à deux facettes. Pour ce, l'éolien en mer devient la source d'énergie la moins chère au Danemark.

Comme bien d'autres pays européens, le Danemark rencontre une certaine opposition locale aux nouvelles implantations de production renouvelable. Celle-ci concerne d'abord l'éolien terrestre, tandis que l'essor du photovoltaïque reste jusqu'ici mieux accepté. Dans ce contexte, le Danemark dispose d'une opportunité majeure avec le développement massif de l'éolien en mer, par le biais de ses îles énergétiques qui permettront de produire suffisamment d'électricité verte pour couvrir les besoins nationaux, mais également ceux liés à la production de dérivés de l'électricité comme l'hydrogène. Situé au-delà de 80 km des côtes, le concept de l'île énergétique de la mer du Nord réduit considérablement l'impact visuel des installations et de ce fait les problèmes d'acceptabilité.

7. T. Menu, « Denmark : A Case Study for a Climate-Neutral Europe », *Études de l'Ifri*, Ifri, avril 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Efforts d'efficacité énergétique

Afin d'atteindre l'objectif d'approvisionnement énergétique totalement vert en 2050, le Danemark a pris conscience du besoin d'efficacité globale dans la façon dont l'énergie est utilisée dans tous les secteurs. Il entend en particulier cibler la consommation d'énergie dans les bâtiments, qui représentent environ 40 % du total de la consommation d'énergie au Danemark. Les exigences énergétiques définies pour les nouveaux bâtiments ont été continuellement resserrées. En 2020, un nouveau bâtiment consommait environ 75 % moins d'énergie qu'en 2006. Mais comme les bâtiments ont généralement une très longue durée de vie (souvent 100 ans ou plus), les bâtiments qui existent aujourd'hui représenteront de loin la majorité des bâtiments existants en 2050. Par conséquent, l'efficacité énergétique des bâtiments existants est un domaine d'intervention important pour la politique énergétique danoise. Depuis 2009, le Danemark s'est doté d'un Centre pour les économies d'énergie. Focalisé tout d'abord sur les économies d'énergies/d'électricité dans le secteur privé, ce centre va permettre aux entreprises de recevoir des recommandations afin de les mener vers des économies sur le chauffage essentiellement.

Intégration sectorielle

Le Danemark définit le système énergétique par quatre vecteurs : le système électrique, le réseau de gaz et les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains. Ces quatre vecteurs ne sont plus considérés séparément dans la politique énergétique danoise. Ils doivent évoluer vers des systèmes interconnectés pour permettre une gestion plus efficace et plus économique du système énergétique. Une centrale de cogénération, par exemple, peut passer du réseau de gaz au réseau d'électricité et de chauffage urbain, tout comme une centrale à gaz de synthèse (appelée Power-to-Gas) peut convertir l'électricité en gaz (par exemple de l'hydrogène). Par conséquent, un vecteur d'énergie peut être utilisé comme stockage pour un autre, et les quatre vecteurs d'énergie peuvent s'offrir une flexibilité mutuelle. Une première illustration concrète est donnée avec le lancement en 2020 du projet de développement des premières « îles énergétiques » permettant de connecter jusqu'à 13 GW d'éolien en mer. Le gouvernement danois, qui détiendra 50 % des parts de l'île (sans les parcs éoliens) dans la mer du Nord, discute actuellement les modalités de financement et de régulation de ces infrastructures (île et projets éoliens associés) avec les potentiels candidats à leur développement. La date de mise en service est de ce fait encore inconnue à ce jour, mais on peut envisager un scénario où les travaux seraient initialisés avant la fin de cette décennie pour une production prévue au début des années 2030.

Cette production d'électricité verte est essentiellement vouée au développement des technologies « Power-to-X » permettant la décarbonation des secteurs comme l'industrie et les transports routiers lourds, aériens et maritimes, pour lesquels l'électrification seule ne permettra ni au Danemark, ni à l'Europe et ni globalement d'atteindre la neutralité carbone de 2050.

Partenariats internationaux

Le Danemark est traditionnellement reconnu pour être un modèle de transition énergétique ayant de hautes ambitions climatiques mais également des résultats probants. Il est important de remarquer que le Danemark, bien qu'ayant une large pénétration d'ENR dans son système électrique, arrive à maintenir un niveau de sécurité d'approvisionnement très élevé de 99,996 % (un des plus hauts d'Europe) de par ses nombreuses interconnexions. L'horizon 2030-2050 du développement massif de l'éolien en mer, correspondant à la réalisation des îles énergétiques, contraint le Danemark à continuer à développer ses interconnexions en Europe du Nord afin de conserver son niveau de sécurité d'approvisionnement.

Cela étant, le Danemark ne représente que 0,07 % de la population mondiale et n'émet que 0,1 % des émissions globales de dioxyde de carbone. Par conséquent, afin d'avoir un impact plus global, le Danemark a misé sur des partenariats intergouvernementaux pour échanger sur des thématiques comme le climat, la transition énergétique, l'éolien, l'efficacité énergétique et les réseaux de chaleur. Le Danemark a maintenant 19 partenariats (dont la France) qui représentent environ la moitié de la population mondiale et qui émettent plus de 60 % des émissions globales de GES. De plus, ces partenaires étaient à l'origine de 72 % des investissements mondiaux dans les ENR en 2017. Le Centre de coopération globale de l'Agence danoise de l'énergie met en œuvre ces accords avec ses homologues étrangers au travers de discussions et d'échanges sur les régulations nécessaires pour assurer un approvisionnement énergétique durable tout en conservant une croissance économique.

FINLANDE

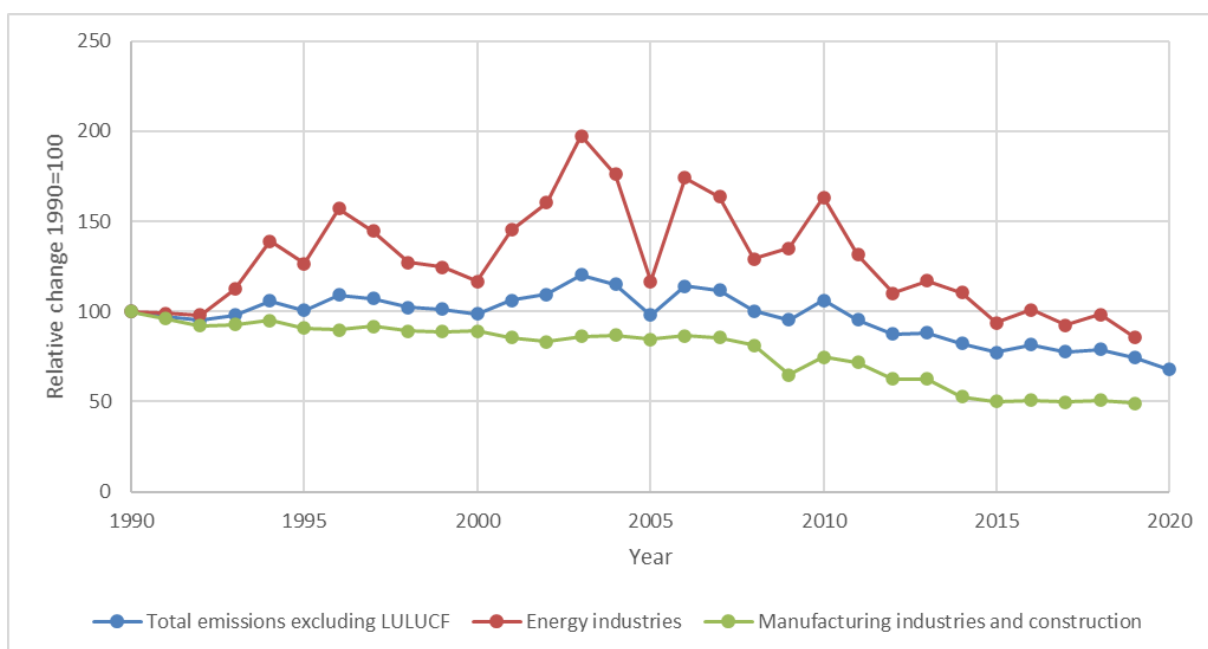
Stratégies finlandaises en matière de politique énergétique et climatique

Mikael Hildén et Paula Kivimaa

Contexte : éléments clés de la politique climatique et de la réduction des émissions

Mesurée en termes de réduction des émissions, la planification des politiques climatiques et énergétiques a été relativement réussie. Les émissions de la Finlande ont diminué d'environ 32 % entre 1990 et 2020, principalement à partir de 2005 (voir graphique 3). Le principal défi pour la réduction des émissions a été la production et l'utilisation de l'énergie, qui est responsable d'environ 72 % des émissions nationales en 2020.

Graphique 3 : Réduction relative des émissions de la Finlande par secteur entre 1990 et 2020



Source : auteurs

La tradition finlandaise consistant à élaborer des stratégies climatiques et énergétiques, qui visent à servir de fondement pour des politiques cohérentes en matière de climat et d'énergie, remonte à 2001⁸. Après cela, des stratégies ont été élaborées ou mises à jour avec des intervalles de quelques années. C'est seulement depuis 2015 que la Loi sur le climat oblige le gouvernement à préparer un plan d'action à long terme sur le changement climatique, ainsi qu'un plan d'action à moyen terme fondé sur les projections et les objectifs du plan à long terme. En outre, le gouvernement a préparé des stratégies séparées en matière d'énergie et de climat. Un objectif important de ces stratégies a été de répondre efficacement aux exigences fixées par les politiques de l'UE.

Au total, environ 40 % des émissions finlandaises proviennent des activités couvertes par le Système d'échange de quotas d'émission (SEQUE) de l'UE. La réduction des émissions dans le cadre du SEQUE s'est accélérée, et la production d'électricité notamment se décarbone rapidement. Cette tendance devrait se poursuivre. Le charbon sera interdit pour la production d'énergie à partir de 2029 et la tourbe est en train d'être activement abandonnée. Les autres sources importantes d'émissions sont les procédés industriels (11 %) et l'agriculture (14 %, hors émissions du secteur de l'utilisation des terres et du changement d'affectation des terres et de la foresterie – UTCATF). Le puits de carbone forestier annuel net est passé, selon les coupes, de 8 à 23 M CO₂ eq.

Le gouvernement actuel s'est fixé comme objectif que la Finlande atteigne la neutralité carbone d'ici 2035 (émissions = puits nets), les puits devant dépasser les émissions peu de temps après. Le processus de formalisation de l'objectif dans la loi est en cours et devrait être achevé d'ici le printemps 2022.

Efforts de cohérence horizontale

Tous les plans et stratégies climatiques et énergétiques sont élaborés sous la direction d'un ministère de coordination constitué à cet effet⁹, mais tous les ministères concernés y contribuent en préparant des documents et en identifiant des actions politiques dans leur domaine de compétence. Ces processus visent à assurer une cohérence (horizontale) entre les branches

8. M. Hildén et P. Kivimaa, « Energy Governance in Finland » in M. Knodt et Kemmerzell (dir.), *Handbook of Energy Governance in Europe*, Springer Nature Switzerland AG, 2020, p. 1-28.

9. Le ministère des Affaires économiques et de l'Emploi coordonnait traditionnellement les plans énergie-climat et continue de le faire aujourd'hui. La Loi sur le climat de 2015 a introduit des plans complémentaires. Elle précise que le ministère des Affaires économiques et de l'Emploi coordonne le plan climat à long terme, tandis que le plan climat à moyen terme est coordonné par le ministère de l'Environnement et le plan d'adaptation au climat par le ministère de l'Agriculture et des Forêts. Contrastant avec cette répartition des tâches, le ministère des Finances a coordonné l'exécution nationale de la Facilité pour la reprise et la résilience de l'UE, qui contient un fort volet climat et énergie impliquant les ministères des Affaires économiques et de l'Environnement.

du gouvernement et à partager la charge intérieure de manière équitable et économiquement justifiée au sein du secteur non commercial. Les stratégies et plans sont approuvés par le gouvernement et soumis au Parlement pour commentaires et débat. Les plans fixent des objectifs quantitatifs pour les différents secteurs, lesquels sont censés préparer leurs propres plans détaillés pour atteindre les objectifs convenus. Ces objectifs ne sont toutefois pas juridiquement contraignants.

Les processus de préparation des plans ont évolué vers une plus grande ouverture et inclusion. Au cours de ces processus, des documents préparatoires sont publiés, les études de fond commandées sont mises à la disposition de tous et les contributions des parties prenantes sont encouragées. Par exemple, la dernière série de stratégies en préparation comprenait une enquête auprès des citoyens et une consultation auprès du peuple Same (peuple indigène présent dans la partie nord de la Finlande). C'est donc un virage important par rapport aux premières stratégies énergétiques, qui étaient en grande partie préparées par un seul ministère. Les documents de référence n'étaient publiés qu'après la publication de la stratégie/du plan.

La Loi sur le climat a contraint le gouvernement à davantage rendre compte de l'action climatique. Un rapport présentant les progrès et analysant les défis doit être soumis chaque année au Parlement. La Loi sur le climat a également créé le Groupe d'experts national indépendant sur le changement climatique, composé de quinze éminents universitaires et d'un secrétariat. Le Groupe d'experts évalue les plans du gouvernement et a pour mandat de fournir ses propres analyses sur les sujets qu'il juge pertinents pour la politique climatique et énergétique. Le gouvernement doit donner au public, aux groupes d'intérêt et au Groupe d'experts la possibilité d'exprimer leurs opinions sur les projets de plans pour le climat. Les avis du Groupe sont généralement repris par les médias et discutés dans le débat public. Les représentants du Groupe et d'instituts de recherche sont normalement invités à présenter leurs points de vue au Parlement, lorsque les plans sont débattus, et les membres du Groupe sont invités dans différents groupes de travail et comités liés à la politique climatique (par exemple, la Table ronde de haut niveau sur la politique climatique, présidée par le Premier ministre). On peut dire que la transparence accrue dans la préparation des plans a amélioré le débat public sur le climat et l'énergie. Ce débat a également accru l'intérêt des médias et les questions climatiques et énergétiques sont aujourd'hui régulièrement traitées dans tous les médias sérieux.

L'intérêt croissant pour les questions climatiques et énergétiques a également profité au débat plus large sur le « verdissement » de l'économie et le développement durable. Ainsi, le développement d'une économie

circulaire est devenu l'un des points à l'ordre du jour du gouvernement actuel¹⁰. L'économie circulaire est considérée comme l'un des moyens d'atteindre les objectifs climatiques et énergétiques. La consommation finlandaise de matériaux est parmi les plus élevées de l'Union européenne par habitant. Le pays des mille lacs s'est donc fixé pour objectif que l'utilisation intérieure de matières premières primaires en 2035 ne dépassera pas son niveau de 2015. Un autre domaine clé qui fait désormais partie de la problématique du développement durable est la préservation de la biodiversité. En Finlande, la protection de la biodiversité est fortement liée au secteur forestier, qui est à la fois un enjeu d'exportation et d'énergie, ainsi qu'à l'économie circulaire. La reconnaissance des liens entre l'énergie, le climat, l'économie circulaire et la biodiversité s'est renforcée, mais il s'est avéré difficile de trouver des solutions parfaitement cohérentes également au niveau opérationnel.

Collaboration public-privé dans l'élaboration des politiques relatives au climat, à l'énergie et aux transports

La Finlande a une longue histoire de collaboration entre les secteurs public et privé pour résoudre les problèmes environnementaux et planifier les politiques, qui remonte aux années 1980. Cette coopération est très visible dans l'élaboration des politiques climatiques et énergétiques. Par exemple, l'un des principaux instruments depuis les années 1990 a été l'utilisation d'accords volontaires dans différents secteurs pour adopter des mesures d'efficacité énergétique¹¹. Le programme d'accords volontaires a couvert les municipalités, les bâtiments et les différentes industries qui les ont signés avec le ministère des Affaires économiques et de l'Emploi. Avec ces accords, les entreprises et municipalités participantes ont convenu de certains objectifs d'efficacité énergétique : une alternative à la réglementation¹². Les accords couvraient plusieurs périodes au cours des vingt dernières années, et le dernier couvre la période 2017-2025. En 2010 déjà, 80 % de la consommation totale d'énergie en Finlande était couverte par ces accords entre le ministère des Affaires économiques et de l'Emploi et les acteurs du secteur privé. Ils ont été considérés comme l'un des exemples de réussite de la politique climatique finlandaise.

10. « Strategic Programme to Promote a Circular Economy », ministère de l'Environnement, disponible sur : <https://ym.fi>.

11. F. Kern, P. Kivimaa et M. Martiskainen, « Policy Packaging or Policy Patching? The Development of Complex Energy Efficiency Policy Mixes », *Energy Research & Social Science*, vol. 23, 2017 p. 11-25.

12. « Energy Efficiency Agreements 2008–2016 », disponible sur : <https://energyefficiencyagreements2008-2016.fi>.

Un autre exemple de collaboration public-privé est le New Transport Policy Club, créé en 2012 pour une période de deux ans, afin de renouveler la politique des transports et de répondre au défi du changement climatique ainsi qu'aux phénomènes parallèles de « servicisation » et automatisation des transports. Caractéristique intéressante du club, il regroupait des personnes visionnaires issues des entreprises, de la recherche et du secteur public – et pas seulement du secteur des transports – pour repenser la politique des transports ; et il a réussi à créer des solutions innovantes et à penser les futurs transports sans émissions du point de vue des services de mobilité¹³. Il a fonctionné comme un « domaine de transition ».

Une évolution plus récente a été la mise en place de « feuilles de route bas-carbone », basées sur le programme gouvernemental de 2019. Les processus de feuille de route réunissaient des représentants de différentes organisations de coordination du secteur privé et d'organisations de la société civile, des experts et des fonctionnaires pour discuter des étapes et des mesures nécessaires pour transformer l'énergie, la mobilité, l'alimentation, l'agriculture, ainsi que divers secteurs industriels, en vue d'une société et d'une économie à faible émission de carbone. Par exemple, le processus « Feuille de route pour des transports sans énergies fossiles » a rédigé un rapport de groupe de travail couvrant le transport routier, ferroviaire, maritime et aérien, qui incluait des recommandations politiques concrètes. Ce processus approfondi a compris plusieurs réunions de sous-groupes en 2020, ainsi que des ébauches envoyées aux parties prenantes pour commentaires. Le processus a permis d'exploiter les dernières connaissances de l'industrie et du milieu universitaire sur les alternatives à un transport à base d'énergie fossile. Ce rapport a ensuite servi de base à la décision gouvernementale concernant la « Feuille de route pour des transports sans énergies fossiles ». Toutes les feuilles de route alimentent la prochaine Stratégie sur le climat et l'énergie ainsi que la Stratégie sur le climat à moyen terme du gouvernement actuel.

Une culture de l'expérimentation dans l'ensemble du gouvernement

La promotion de la culture de l'expérimentation dans l'administration publique a commencé à susciter de l'intérêt vers 2014-2015 et a fait partie du programme gouvernemental de 2015. L'idée était de promouvoir des expérimentations dans, par exemple, les activités municipales et la numérisation, pour trouver des solutions innovantes, améliorer les services, faire progresser l'entrepreneuriat et renforcer la collaboration.

13. P. Kivimaa et K. Rogge, « Interplay of Policy Experimentation and Institutional Change in Sustainability Transitions : the Case of Mobility as a Service in Finland », *Research Policy*, vol. 51, n° 1, 2022.

L'expérimentation a également été utilisée dans la politique climatique et énergétique. Par exemple, la politique de transport à faible émission de carbone a bénéficié d'expériences menées sous l'égide du Traffic Lab, lancé en 2015, qui a créé un nouveau type de collaboration public-privé et changé les attentes concernant l'avenir des transports¹⁴. Un autre programme-cadre d'expérimentation est HINKU, le programme des municipalités pour la neutralité carbone, qui existe depuis 2008 et permet l'échange de connaissances et la conduite d'expériences conjointes, en particulier entre petites municipalités. HINKU permettait déjà d'obtenir en moyenne une réduction des émissions de 21 % dans les municipalités participantes au cours de la période 2007-2013¹⁵. Par ailleurs, le programme Villes durables du ministère de l'Environnement lance 12 projets expérimentaux. D'autres exemples concernent des expériences de rue sur le climat¹⁶, des initiatives visant à introduire des sources de protéines alternatives dans les écoles finlandaises¹⁷ et un travail de documentation de plus de 100 expériences liées à l'énergie¹⁸.

L'approche expérimentale a permis de désapprendre les pratiques de l'administration qui étaient en place et favoriser de nouveaux types d'apprentissage scientifique et normatif concernant les futures sociétés à faibles émissions de carbone. Un exemple concret est la façon dont les apprentissages produits par les expérimentations dans le domaine des transports intelligents ont conduit à un renouvellement réglementaire majeur qui a favorisé la création de marchés de nouveaux services de mobilité visant à remplacer la voiture¹⁹. De plus, les plateformes cadre d'expérimentation HINKU et Traffic Lab, qui étaient initialement des projets à court terme, sont devenues des dispositifs de gouvernance permanents. Il est cependant clairement nécessaire d'évaluer de manière plus systématique les expériences menées²⁰.

14. *Ibid.*

15. R. Antikainen, K. Alhola et T. Jääskeläinen, « Experiments as a Means Towards Sustainable Societies – Lessons Learnt and Future Outlooks from a Finnish Perspective », *Journal of Cleaner Production*, vol. 169, 2017, p. 216-224.

16. S. Juhola, A. Seppälä et J. Klein, « Participatory Experiment on a Climate Street », *Environmental Policy and Governance*, vol. 30, n° 6, 2020, p. 373-384.

17. T. Peltola, M. Kaljonen et M. Kettunen, « Embodied Public Experiments on Sustainable Eating : Demonstrating Alternative Proteins in Finnish Schools », *Sustainability : Science, Practice and Policy*, vol. 16, 2020, p. 184-196.

18. E. Heiskanen, K. Hyvönen, S. Laakso, P. Laitila, K. Matschoss et I. Mikkonen, « Adoption and Use of Low-Carbon Technologies : Lessons from 100 Finnish Pilots, Field Experiments and Demonstrations », *Sustainability*, vol. 9, n° 5, 2017, p. 847.

19. P. Kivimaa et K. Rogge, 2022, *op. cit.*

20. E. Heiskanen *et al.*, 2017, *op. cit.*

Points critiques

Malgré les processus stratégiques horizontaux et de nombreuses évolutions politiques positives, la Finlande est toujours confrontée à des défis importants pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2035 et réduire de 40 % les émissions d'ici 2030 dans le secteur non commercial conformément à l'objectif fixé par l'UE. Parmi ses principaux défis, citons :

- 1) L'achèvement de la transformation énergétique dans le domaine du chauffage, avec la nécessité de réduire la dépendance à la combustion (notamment les énergies fossiles, mais aussi la tourbe et le chauffage au bois)
- 2) le développement du stockage d'énergie et de la réponse à la demande ;
- 3) la décarbonation de l'industrie lourde ;
- 4) la décarbonation des transports et la réduction du volume du transport automobile ;
- 5) la réduction des émissions dans le secteur UTCATF (agriculture, en particulier sols tourbeux et tourbières drainées à usage forestier).

Tous ces domaines font l'objet de recherche et développement (R&D), mais la Finlande a besoin d'investissements majeurs, d'une mise à l'échelle des solutions prometteuses et de politiques de soutien, y compris dans les domaines de la fiscalité, de la passation de marchés et de la planification. Une mise en œuvre efficace des politiques dans ces domaines est nécessaire pour encourager les nouveaux investissements et la R&D dans le secteur privé et par les services publics d'énergie, qui appartiennent en tout ou en partie aux municipalités.

ITALIE

Construire et anticiper une mobilité durable : l'exemple milanais

Cécile Maisonneuve

Choisir Milan pour évoquer les politiques de mobilité durable déployées aujourd'hui dans les villes européennes ne va pas de soi. D'aucuns auront en tête les épisodes récurrents de smog dans une ville connue pour la qualité médiocre de son air qu'elle doit en partie à sa géographie : le dernier date du 2 février 2020 et a conduit les autorités à l'interdiction pure et simple de la circulation automobile. Deux ans auparavant, la Commission européenne saisissait d'ailleurs la Cour de justice de l'UE concernant l'Italie pour infraction continue aux limites en matière de pollution de l'air. Qui plus est, la Milan industrielle, aux façades noircies par la pollution, reste associée à l'imaginaire urbain de la capitale lombarde, qui vit naître en 1906 la première usine d'Alfa Romeo – A. L. F. A. étant l'acronyme de Anonima Lombarda Fabbrica Automobili – ou encore la si prestigieuse marque d'automobiles de luxe, Isotta Fraschini. La ville porte la marque de cette prestigieuse histoire de l'industrie automobile milanaise, comptant avec un taux de possession automobile particulièrement élevé par rapport à d'autres métropoles européennes. Enfin, de prime abord, rien ne distingue Milan des autres villes qui, en Europe, ont développé depuis une quinzaine d'années une politique de mobilité visant à réduire l'usage de la voiture individuelle, investi dans les transports en commun, développé la mobilité partagée – vélos en libre-service depuis 2008 – ou encore promu les modes actifs tels que la marche et le vélo. Milan peut donner l'impression d'une ville qui ne fait que suivre un mouvement global dont elle n'est toutefois ni pionnière ni leader.

Un modèle innovant de tarification de l'usage de l'espace public

Un regard plus aiguisé sur la politique de mobilité milanaise révèle cependant qu'au-delà de ce qui devient la norme dans l'arsenal des politiques de mobilités durables, la deuxième ville d'Italie en nombre d'habitants – 1 404 239 habitants en 2019 – qui forme le cœur de la plus

grande aire urbaine du pays, avec ses 7 123 563 habitants en 2009, a développé une politique de mobilité dont certaines caractéristiques méritent d'être partagées.

Avec Londres (2003) et Stockholm (2007), Milan fait ainsi partie des premières villes européennes à mettre en place un péage urbain, en 2008, sous la forme d'une tarification de la pollution (*pollution charge*). L'objectif est simple : décourager l'utilisation de véhicules privés polluants à l'intérieur de la zone centrale de Milan sur un périmètre limité de 8,2 kilomètres carrés (km²), là où le péage londonien s'organisait autour d'une surface de 20,7 km² et de 30 km² à Stockholm. L'initiative cependant fait long feu sous l'effet d'une multiplication des dérogations qui, en trois ans, neutralisent la décision de 2008. Sans surprise, la tarification routière est l'un des sujets phares de la campagne pour les élections municipales de 2011, dans une ville qui se prépare à accueillir, en 2015, l'Exposition universelle. Bien que de nature purement consultative, un référendum promu par des groupes de défense locaux organisé en juin 2011, en même temps que le scrutin municipal, propose d'étendre la surface de la zone de tarification routière et de passer d'une tarification de la pollution à une tarification de la congestion, afin de réduire à la fois la congestion et la pollution. Sont également proposées un certain nombre de mesures politiques et infrastructurelles visant à soutenir le passage à une mobilité urbaine durable. Fait remarquable, le référendum est approuvé par 79 % des votants, ce qui contraste fortement avec l'expérience d'autres villes, où les électeurs soit ont rejeté le système de tarification (Édimbourg, Manchester) soit l'ont accepté du bout des lèvres (51 % à Stockholm). Quant au péage urbain de Londres, il a été introduit en 2003 sans référendum.

Les quatre leçons de la « zone C »

Une quadruple leçon doit être tirée de l'expérience milanaise de la « zone C », nom officiel du dispositif. En premier lieu, de telles mesures requièrent un fort soutien de la population : à cet égard, l'association d'un scrutin et d'un vote dédié *via* le référendum confère à de tels projets une solide base démocratique. En deuxième lieu, Milan est la seule ville au monde à avoir expérimenté deux types de tarification – redevance sur la pollution puis péage de congestion – de l'usage de l'espace public en milieu urbain dense : l'échec de la première expérience n'a pas été vécu comme invalidant par principe tout système de tarification, la ville ayant réussi à en tirer les leçons pour proposer une autre architecture. En troisième lieu, comme l'avait de longue date montré l'exemple pionnier de Singapour, la mise en place de mesures restrictives à la circulation automobile est acceptable à condition que des alternatives crédibles soient proposées. À cet égard, le déploiement d'une offre de transports publics dense et fiable ainsi que les appoints représentés par une gestion maîtrisée des systèmes de mobilité partagée – vélos en libre-service, etc. – est à mettre au crédit de

L'opérateur public de transports milanais, ATM, par ailleurs collecteur des revenus tirés du péage urbain, ensuite transmis à la ville qui les affecte à de nouveaux projets de mobilité. En étroite coordination avec les gestionnaires urbains, c'est très progressivement que des opérateurs privés de mobilité partagée ont été autorisés par ATM à offrir leur service. Dit autrement, la ville a gardé la haute main sur un espace public qu'elle restructurait en parallèle pour le rééquilibrer au projet des usages non automobiles, sans céder aux sirènes d'un « *benign neglect* » observé dans nombre de villes européennes qui ont laissé les plateformes numériques déployer vélos et trottinettes de manière anarchique dans l'espace public. Enfin, dernière leçon qu'il faut tirer de l'expérience milanaise de 2012 : ces mesures fortes en matière de politique de mobilité durable se sont déployées alors que, dans le même temps, la ville engageait d'une part des opérations de requalification urbaine de vastes quartiers, et d'autre part de grands chantiers cherchant, à travers une architecture ambitieuse, à exprimer la vitalité économique de Milan. À cet égard, l'engagement de l'Exposition universelle de 2015 était à la fois l'objectif et le signal de la volonté de la ville de s'engager dans une nouvelle dynamique. La nouvelle politique de mobilité, bien plus qu'une politique suiviste d'un mouvement global touchant l'ensemble des métropoles européennes, doit donc s'analyser comme l'un des marqueurs de cette nouvelle ambition urbaine globale de la capitale lombarde.

Des résultats probants

La méthode milanaise a porté ses fruits. Le programme a permis de réduire les encombrements, les accès des véhicules à la « zone C » ayant diminué de 28 % par rapport aux niveaux antérieurs à son introduction. La demande de stationnement sur voirie a diminué de 10 %, la vitesse de déplacement des transports en commun de surface s'est accrue, ainsi que leur fréquentation, tandis que la productivité des livraisons de marchandises dans Milan a augmenté de 10 %. Le nombre d'accidents de la route avec blessés a diminué de 26,3 %. Les émissions ont également été réduites – la pollution locale de 10 % et le CO₂ de 35 %. De ce fait, en ayant construit les fondements d'une démarche crédible et d'une méthode solide, la ville a pu déployer, à partir de 2019, la « zone B », qui étend la zone à trafic limité quasiment à l'intégralité de la ville (132 km² soit 70 % de la surface de la ville mais 97 % de la population), en excluant les véhicules les plus polluants. Il s'agit de l'une des plus larges zones à faible émission d'Europe. Précisons qu'il ne s'agit pas d'un nouveau péage urbain, qui reste réservé à l'hypercentre de la zone C.

Enseignements pour la France

Les deux mesures ont cependant en commun deux caractéristiques qui mériteraient d'être étudiées de plus près par nombre de villes qui, en France par exemple, reportent la mise en place des zones à faible émission au motif qu'elles pénalisent les professionnels (artisans, etc.) et sont attentatoires à la protection de la vie privée (identification des plaques minéralogiques). La combinaison d'une infrastructure physique (barrières électroniques) et numérique (système de « black box » intégré au véhicule), déployée en partenariat entre l'opérateur de mobilité ATM, doté d'une expertise numérique mondialement reconnue, et le système universitaire milanais (rappelons que la ville abrite les prestigieuses universités que sont la Bocconi et l'Institut polytechnique de Milan) a permis de trouver des solutions qui garantissent à la fois protection de la vie privée et les nécessaires exemptions pour un certain nombre d'activités économiques. Propriétaire des données recueillies, la ville de Milan joue le rôle de tiers de confiance dans un pays dont l'autorité de protection des données est l'une des plus exigeantes en Europe. La solidité du système et l'intelligence de sa gouvernance permettent d'ailleurs à l'autorité milanaise de coopérer pour exporter ce système dans d'autres villes telles qu'Oslo, Londres ou Shanghai.

Avec cette étape dans la politique de contrôle de la voiture individuelle en milieu urbain, Milan franchit un nouveau cap et nous livre un premier enseignement fondamental : la construction d'une mobilité urbaine durable requiert des recettes dédiées dont la source la plus efficace est le péage urbain, outil de financement le plus puissant des nécessaires alternatives à déployer pour que « durable » et « punitif » ne deviennent pas synonymes. Elle est indissociable également d'une forte montée en puissance numérique des autorités de mobilité qui seront, à l'avenir, des gestionnaires de données autant que de mobilité. Elle appelle ensuite une gouvernance solide, avec en son cœur l'autorité municipale, qui doit impliquer la recherche universitaire. Enfin, elle prend du temps car elle signifie la combinaison de mesures fortes et difficiles à mettre en œuvre telles que le péage urbain : à cet égard, il est douteux que la mise en place de zones à faible émission sans le complément du péage urbain soit autre chose qu'un cautère sur une jambe de bois. Elle prive en effet les villes d'une ressource fondamentale et d'un levier de discussion pour aborder ce qui sera la nouvelle étape : l'inclusion de la périphérie dans la mobilité durable, alors que c'est là qu'ont lieu la majeure partie des émissions dans nos villes européennes et qu'elle requerra des investissements massifs en offre de transports alternative. L'occasion ratée de l'inclusion, dans la loi d'orientation des mobilités de 2019, d'une base législative efficace permettant aux villes françaises qui le souhaitent de mettre en place un péage urbain – pourtant prévue dans le projet de loi initial – n'a pas fini de peser.

Le potentiel ouvert par la stratégie milanaise de mobilité durable est considérable, et c'est aussi à l'aune de cette capacité d'anticipation qu'il convient de juger une politique de mobilité : mentionnons par exemple l'intéressant classement de villes établi par le cabinet Oliver Wyman et l'Institute of Transportation de l'université de Berkeley, qui met en valeur le potentiel de transformabilité des systèmes de mobilité urbaine plutôt qu'une photographie de la situation à l'instant T. Gageons à cet égard que Milan aura encore beaucoup à nous enseigner dans la décennie décisive qui s'ouvre pour que nos systèmes de mobilité entament enfin leur nécessaire décarbonation. Elle a déjà commencé avec l'adoption à la fin de 2021 de l'un des plans européens les plus ambitieux de déploiement d'une infrastructure cyclable (750 kilomètres) à l'échelle de la métropole à l'horizon 2035, doté de 250 millions d'euros.

ALLEMAGNE

Développer et mettre à l'échelle les futures technologies solaires et promouvoir la chaîne de valeur européenne : le rôle de Fraunhofer

Andreas Bett et Hans-Martin Henning

La mission de Fraunhofer est de mener des recherches appliquées et d'avoir un impact sur le marché, en étroite collaboration avec l'industrie. L'un des principaux objectifs de Fraunhofer ISE est le développement technologique tout au long de la chaîne de valeur du photovoltaïque (des *wafers* aux modules en passant par les cellules). Cela concerne différentes classes de matériaux : silicium, semi-conducteurs III-V, pérovskites et semi-conducteurs organiques. C'est pourquoi nous soutenons le passage du laboratoire à l'usine, par exemple par le traitement pilote de cellules et modules photovoltaïques industriels en silicium ainsi que de cellules solaires multi-jonctions III-V. L'objectif est d'aider l'industrie à transférer les processus développés vers leurs lignes de production. Cela s'accompagne d'une analyse des coûts et d'une évaluation de la technologie pour les cellules et modules photovoltaïques industriellement réalisables, soutenant ainsi l'industrie dans la mise à l'échelle et l'analyse des risques.

En tant qu'organisation à but non lucratif, Fraunhofer n'a aucun objectif de profit et cherche à jouer un rôle neutre dans le système d'innovation allemand et contribuer, par exemple, aux processus de normalisation pour un large éventail de technologies.

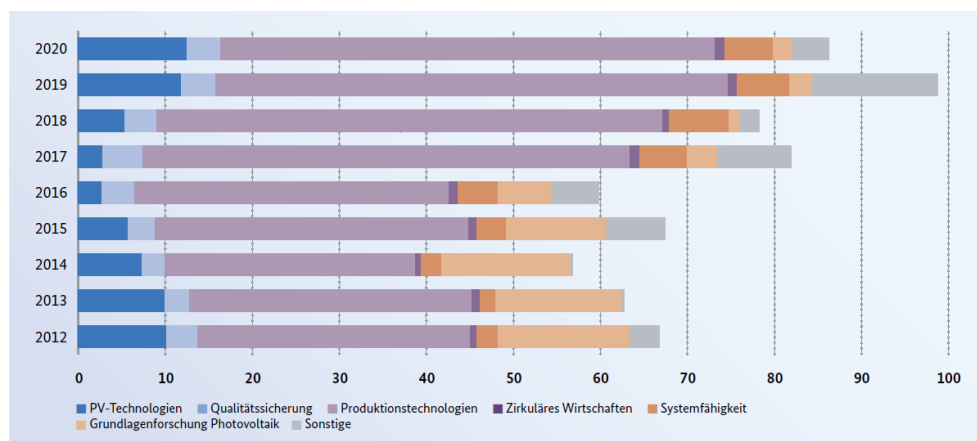
Le financement de Fraunhofer ISE repose sur plusieurs piliers :

- Recherche directement commandée par l'industrie
- Projets de recherche financés par des fonds publics
- Programmes de financement internes

Fraunhofer ISE vise plus de 30 % de financement de l'industrie, environ 60 % de financement public et 10 % de financement interne. En conséquence, la Fraunhofer-Gesellschaft maintient un équilibre dynamique entre la recherche fondamentale orientée vers les applications et le transfert à travers des projets de développement innovants. La nécessité de sécuriser sans cesse des fonds permet de s'assurer que les travaux de Fraunhofer restent pertinents au regard de l'actualité, des besoins de l'industrie et des priorités de financement public.

En 2020, le financement de projets de recherche pour le secteur de l'énergie en Allemagne s'est élevé à 751 millions d'euros, dont 256 millions d'euros ont été alloués aux technologies de production. Le PV en représente la majeure partie avec 86 millions d'euros, devant l'éolien avec 76 millions d'euros. Les projets de recherche sur la sûreté nucléaire ont reçu 49 millions d'euros de financement. Les centrales solaires thermiques, comme les autres technologies solaires, ont reçu 8 millions d'euros. L'historique du financement par projet pour le photovoltaïque montre une augmentation progressive depuis 2017, illustré avec le graphique 4.

Graphique 4 : Financement de projets dans le domaine du photovoltaïque en millions d'euros



Note : financement ventilé en technologies photovoltaïques, assurance qualité, technologies de production, économie circulaire, capacité du système, recherche fondamentale en photovoltaïque et autres.

Source : « Bundesbericht Energieforschung 2021 – Forschungsförderung für die Energiewende », ministère fédéral allemand de l'Économie et de l'Action pour le climat, mars 2021, disponible sur : www.bmwi.de.

Priorités : PV solaire, PV thermique et intégration système

Pour les centrales photovoltaïques, l'optimisation des performances et l'assurance qualité sont réalisées de la planification à l'exploitation. Cela comprend également la prévision de l'irradiance et de la puissance solaires.

Fraunhofer s'efforce toujours de garder une longueur d'avance sur l'état actuel de la technique – par exemple, grâce à la R&D sur les cellules

solaires en tandem et d'autres concepts innovants qui ne sont pas encore mûrs pour le marché. Mais en parallèle, Fraunhofer soutient la technologie industrielle actuelle, en faisant des essais de processus d'optimisation évolutifs, et contribue à garantir la qualité des lignes de production.

Fraunhofer ISE s'intéresse également aux technologies solaires thermiques à basse température pour le chauffage de bâtiments et l'approvisionnement en eau chaude sanitaire, notamment à travers le développement de composants innovants, de systèmes et d'algorithmes de contrôle pertinents. La chaleur représentant environ deux tiers de la demande énergétique finale des industries, les solutions pour fournir de la chaleur aux processus industriels selon des méthodes renouvelables constituent un enjeu important pour les pays industrialisés comme la France et l'Allemagne. Nos activités concernent également les centrales solaires thermiques à concentration, où nous axons nos efforts sur les enjeux à haute pertinence industrielle tels que la réduction de la maintenance grâce à des technologies de nettoyage économes en eau, ou l'optimisation du fonctionnement à l'aide de techniques de contrôle avancées, y compris des algorithmes basés sur des méthodes d'apprentissage automatique. Pour tous les types de technologies solaires thermiques, nous travaillons également sur des mesures d'assurance qualité qui incluent la normalisation, la définition, la certification et la surveillance.

De plus, les technologies d'intégration des systèmes (comme les stockages électriques et thermiques, les technologies de l'hydrogène) joueront un rôle clé dans une future mise à l'échelle des technologies solaires et sont, elles aussi, étudiées de près par Fraunhofer ISE. Des technologies d'électronique de puissance seront nécessaires pour connecter tous les appareils de production et de consommation au réseau électrique. Et, de plus en plus, l'électronique de puissance doit aussi fournir des services auxiliaires tels que le contrôle de la tension et de la fréquence. La R&D de Fraunhofer ISE s'intéresse donc tout particulièrement à l'électronique de puissance avancée, qui peut fournir un soutien au réseau à différents niveaux de puissance.

Chef de file dans la promotion de l'innovation, de la mise à l'échelle et de l'industrialisation

Pour conduire l'innovation, un environnement adapté doit être mis en place. Cela comprend la R&D ainsi que la production industrielle. Une étroite collaboration entre l'industrie et les instituts de R&D est une condition préalable à l'innovation. Par conséquent, la souveraineté technologique s'impose, qui inclut la production industrielle des technologies tout au long de la chaîne de valeur, condition nécessaire pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. Il est en outre nécessaire de

développer les concepts de production écologique et de circularité, ce qui permettra des innovations et des avantages compétitifs.

Les approches sélectionnées pour différentes technologies de systèmes d'énergie solaire sont, entre autres :

- Pour le photovoltaïque, il faut développer une voie spécifique permettant de donner différentes fonctions aux zones de production photovoltaïque. Citons par exemple l'agrivoltaïque, le photovoltaïque flottant, le photovoltaïque intégré au bâtiment ou le photovoltaïque intégré plus général. Et une collaboration étroite avec les industries pour développer des concepts tels que le « photovoltaïque vert » à faible empreinte carbone qui a le potentiel de revitaliser l'industrie photovoltaïque européenne grâce à des normes environnementales et de durabilité élevées.
- Pour les technologies de l'hydrogène, il existe une forte demande d'industrialisation de la production, par exemple pour les piles à combustible et les électrolyseurs.
- Dans le domaine de l'électronique de puissance, il est nécessaire de développer des onduleurs particulièrement fiables et durables qui affichent des durées de vie similaires à celles de la production d'électricité renouvelable, par exemple des convertisseurs d'énergie éolienne et photovoltaïque, et d'autres composants de réseau.
- Dans le domaine du bâtiment, l'industrie européenne est bien positionnée vis-à-vis de la concurrence. En développant des projets de plateforme, par exemple pour les pompes à chaleur, l'Europe pourra maintenir cette position face aux concurrents asiatiques. Les spécificités culturelles des traditions et techniques de construction exigent également des solutions régionales, en particulier dans le domaine très important de la rénovation.
- La standardisation et des solutions système mieux intégrées sont nécessaires, en particulier dans la production industrielle. Il convient de remplacer l'énergie à forte intensité de carbone par des approches systémiques où l'intégration technologique et le couplage régional nécessitent non seulement de nouveaux produits mais aussi des outils d'optimisation à différents niveaux.

Ces approches ouvrent des opportunités pour l'industrie de l'UE et peuvent maintenir ou accroître la création de valeur locale.

Perspectives pour favoriser une nouvelle industrie solaire européenne et pour la coopération franco-allemande

Pour innover, mettre à l'échelle et industrialiser avec succès, les acteurs doivent s'engager en faveur de la recherche sur l'énergie, et ce sur le long terme. Fraunhofer ISE existe depuis plus de 40 ans et plusieurs technologies qui entrent aujourd'hui sur le marché sont au cœur de ses préoccupations depuis des décennies. En effet, l'institution cultive une vision claire de ce qui est nécessaire pour le futur système énergétique. Un financement public continu des projets était également important pour réussir à long terme. Il convient donc de veiller à ce que les délais nécessaires au développement technologique soient pris en compte, notamment dans les financements publics.

Les dialogues entre les parties prenantes, c'est-à-dire entre la recherche, l'industrie et les politiques, jouent également un rôle majeur dans l'identification des besoins et des opportunités. Fraunhofer a toujours essayé d'entretenir un lien avec toutes les parties prenantes impliquées afin d'orienter avec pertinence sa R&D.

Notre recherche maintient une continuité dans les sujets généraux, par exemple le photovoltaïque au silicium, mais nous intégrons en permanence des idées prometteuses. De plus, l'approche de Fraunhofer ISE, par un travail allant du matériau aux centrales photovoltaïques, aide à identifier les potentiels et à résoudre les problèmes de manière pragmatique.

Lors de la création de l'institut il y a 40 ans, ses fondateurs ont pris la décision stratégique de ne pas développer seulement les technologies solaires au sens étroit, telles que les capteurs photovoltaïques et solaires thermiques et les centrales électriques. Ils ont toujours pris en compte l'intégration de leur système. La recherche et le développement ont donc été menés avec une grande continuité, par exemple pour l'électronique de puissance, les technologies de stockage (électrique, thermique), les technologies de l'hydrogène et les technologies du bâtiment, et nous considérons cela comme l'un des facteurs de succès de l'institut. Aujourd'hui, cela lui permet d'offrir des solutions système optimisées dans leur ensemble et ce pour divers clients, des propriétaires de bâtiments aux services publics en passant par les sociétés immobilières, les propriétés industrielles ou des villes entières.

Nous croyons fermement aux grandes chances de succès d'une chaîne de valeur du photovoltaïque européenne. Les points clés pour assurer la compétitivité de la production de modules PV en Europe sont les suivants²¹ :

21. J. Rentsch, « European Solar Industry Could Be Ready For a Comeback », Fraunhofer ISE, 9 septembre 2019, disponible sur : www.ise.fraunhofer.de.

- Les coûts de transport des modules finis ou des matériaux de la Chine vers l'Europe doivent être pris en compte dans l'analyse des coûts. Avec des coûts de module d'environ 0,20 euro/watt crête (Wc), les frais de transport des modules de la Chine vers l'Europe représentent aujourd'hui près de 10 % du coût global, et la facture est croissante.
- Une capacité de production européenne de plus de 5 GWc par an peut entraîner d'importantes économies d'échelle tant au niveau de l'exploitation que de l'approvisionnement.
- Le potentiel élevé du marché au sein même de l'UE et le développement de sites de production de l'ordre du gigawatt devraient favoriser une relocalisation de la chaîne d'approvisionnement en matériaux pour la production de lingots, de *wafers*, de cellules et de modules en Europe. Il serait alors possible d'acheter dans la région les matériaux essentiels, à des prix compétitifs.
- L'Europe effectue déjà des contrôles stricts du CO₂ et d'autres émissions nocives. Si l'économie circulaire, la conception « du berceau au berceau » et les stratégies de recyclage sont également mises à contribution, l'Europe est parfaitement en mesure de rendre le système énergétique réellement durable et de fournir une énergie véritablement « verte ».

Les goulots d'étranglement de l'approvisionnement que l'on connaît actuellement dans l'industrie des semi-conducteurs soulignent l'importance d'une chaîne de valeur photovoltaïque européenne pour réduire la dépendance à l'international.

La recherche coopérative en Europe est utile pour accélérer les innovations et le transfert de technologie vers l'industrie. Ainsi, Fraunhofer ISE a déjà des accords de coopération bilatéraux avec le CEA-Liten et l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF) en France. L'échange scientifique permet d'obtenir plus rapidement et plus efficacement les innovations nécessaires. En ce qui concerne la relance de la production PV tout au long de la chaîne de valeur, une approche coopérative est clairement favorisée. Comme pour la microélectronique et les batteries, un PIIEC (Projet important d'intérêt européen commun) pour le PV permettrait de rétablir une production PV rentable.

Par ailleurs, une coopération renforcée entre la France et l'Allemagne est nécessaire sur les sujets suivants afin de répondre aux principaux enjeux d'une transformation du système énergétique commun aux deux pays :

- Répondre à la forte demande en chaleur de l'industrie au moyen des ENR (systèmes solaires thermiques et pompes à chaleur haute température, électrification et intensification de la production, démarches d'efficacité énergétique), ce qui requiert un cycle d'innovation beaucoup plus rapide.

- Réduire l'empreinte carbone du parc immobilier existant, à la fois en réduisant la demande en chaleur et en fournissant la chaleur restante au moyen de sources renouvelables. Pour cela, la France et l'Allemagne peuvent s'appuyer par exemple sur des réseaux de chauffage intelligents, un couplage sectoriel et des innovations en matière d'économie d'énergie.
- Réduire les coûts de production renouvelable d'hydrogène vert, de méthane, d'ammoniac et d'autres vecteurs énergétiques (P2G, P2L). Ici aussi, les relations traditionnellement fortes de la France et de l'Allemagne avec les pays de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) devraient contribuer à l'optimisation du système énergétique.
- Procéder à des échanges d'électricité entre les pays européens et les pays MENA dans un réseau de transmission CCHT commun, pour optimiser l'usage des sites de production. Cela nécessite des politiques conjointes et le recours à des technologies de concentrateur solaire. La France et l'Allemagne pourraient jouer un rôle moteur à cet égard.

Tout ceci nécessite une vision européenne qui doit être portée par un leadership franco-allemand.

Annexe : liste des publications de l'Ifri sur les enjeux européens de la transition énergétique

Carole Mathieu, « Le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF) de l'UE : une pièce du puzzle de la décarbonation de l'industrie », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 9 mars 2022, disponible sur : www.ifri.org.

Cédric Philibert, « Réduire d'urgence la demande d'énergie : l'impératif de mener de front des actions sur l'offre et la demande », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 17 mars 2022, disponible sur : www.ifri.org.

Marc-Antoine Eyl-Mazzega, « Face au mur : l'énergie et le climat dans la campagne électorale allemande », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 21 septembre 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Marc-Antoine Eyl-Mazzega et Carole Mathieu, « Crise des prix de l'énergie : une épreuve de vérité pour le Pacte vert européen », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 10 novembre 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Alain Karsenty et Nicolas Picard, « Quelle stratégie européenne pour lutter contre la déforestation importée ? », *Édito Énergie*, Ifri, 19 octobre 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Sylvie Cornot-Gandolphe, « Vers un rôle accru du CCS dans la décarbonation industrielle en Allemagne et en France », *Études de l'Ifri*, Ifri, septembre 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Cédric Philibert, « Après l'éclatement de la bulle : les facteurs de développement des chaînes de valeur internationales de l'hydrogène », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 17 septembre 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Carole Mathieu, « La batterie verte : un avantage compétitif pour l'industrie européenne du véhicule électrique ? », *Études de l'Ifri*, Ifri, avril 2021, disponible sur : www.ifri.org.

Marc-Antoine Eyl-Mazzega et Carole Mathieu, « La dimension stratégique de la transition énergétique. Défis et réponses pour la France, l'Allemagne et l'Union européenne », *Études de l'Ifri*, Ifri, avril 2019, disponible sur : www.ifri.org.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org